

引用格式:凡玉梅,赵庆飞,张英利.相似油田定量筛选的方法及应用[J].油气藏评价与开发,2021,11(5):766-771.

FAN Yumei, ZHAO Qingfei, ZHANG Yingli. Quantitative screening methods of similar oil fields and their application[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(5):766-771.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.05.015

相似油田定量筛选的方法及应用

凡玉梅¹,赵庆飞¹,张英利²

(1.中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083;2.中国石油国际勘探开发有限公司,北京 100083)

摘要:在油气田开发过程中,针对未开发或者开发初期油藏,常常采用类比法开展开发技术政策研究以及开发指标的预测。类比样本即相似油气田的筛选决定了类比结果的可靠性。综合应用灰关联和地质因素分析法,根据类比参数和类比目标的本质关联,定量确定类比参数和权重,根据被研究对象的油藏类型,引入参数阈值,计算样本油田的相似度,筛选相似度高的油田作为技术政策研究及指标预测的参考样本,使类比分析的客观基础条件更加合理,提高筛选效率及类比结果的可靠性。

关键词:灰关联;基准参数;阈值;相似度;定量类比

中图分类号:TE32

文献标识码:A

Quantitative screening methods of similar oil fields and their application

FAN Yumei¹, ZHAO Qingfei¹, ZHANG Yingli²

(1. Sinopec Petroleum Exploration & Production Institute, Beijing 100083, China;

2. China National Oil and Gas Exploration & Development Company, Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: During the development of oil and gas field, the analogy method is often used to study the development technology policy and predict the development index for the undeveloped or early stage reservoir. The selection of analogy samples, i.e. similar oil and gas fields, determines the reliability of analogy results. Therefore, gray correlation and geological factor analysis are used to determine the analogy parameters and weights quantitatively on the basis of the essential correlation between analogy parameters and analogy objectives. According to the reservoir type of the studied object, the parameter thresholds are introduced to calculate the similarity of the samples, and the oilfields with high similarity are selected as the reference samples for the technical policy research and index prediction, so as to make the basic conditions of the objective basis of analogy analysis are more reasonable, and further improve the efficiency of screening and the reliability of analogy results.

Keywords: grey relation, basic parameters, threshold, similarity, quantitative analogy

随着勘探开发深入,新发现储量或者保有剩余储量的品位越来越差,开发难度越来越大,如何快速评价筛选相对有潜力的区块,为下步开展动用可行性精细评价是一项意义重大的工作。类比法作为初步快速筛选,在现场应用广泛。研究人员根据经验法选择不同类比参数,导致类比的结果多样化;在筛

选相似油田时,油田相似度计算仅仅考虑参数数值,忽略了参数的地质意义,导致筛选结果与研究油田差异大,类比结果可靠性差。

近年来,在油气田开发中有关于类比法定量模型的研究,重点介绍了相似度定量类比方法,运用油田开发相似准则,比如常用的储量相似准则、采收率

收稿日期:2020-10-14。

第一作者简介:凡玉梅(1971—),女,本科,高级工程师,油气田开发。地址:北京市昌平区中国石化科学技术研究中心,邮政编码:102206。E-mail:fanymsyky@sinopec.com

基金项目:中国石化科技部研究项目“石油探明未开发储量动用优选评价及潜力研究”(P18055-3)。

相似准则、采油速度相似准则以及产量相似准则等^[1],计算类比对象相似度,根据计算相似度推演类比对象的相似特征,得出新对象的类比结论。该研究提供了一种类比法的定量模型,但计算相似度采用的油藏微观参数具体且难以收集,针对未开发油田或者开发初期油田,难以应用该研究进行快速有效的筛选相似油气田。

针对这些问题,该文应用灰关联方法和地质因素分析方法,采用常规的储层、流体参数,定量确定权重,引入参数阈值使筛选的相似油气田更加符合被类比对象的物理意义,使类比研究的客观基础更加科学合理。

1 多元多系统定量类比方法

根据相似原理,如果2个渗流系统满足油藏地质特征相似、油藏流体相似、开发方式相似,则它们满足相似关系,可以进行类比研究^[2]。在勘探开发中,为了类比结果的可靠性,需要尽可能地确认对象间的相同点,相同点越多,二者的关联度就会越大,结论就可能越可靠^[1]。多元多系统定量类比方法是针对孔隙性油藏,基于灰色关联理论和相似性理论,综合应用统计方法、地质因素分析方法、类比方法^[3],完善了多元多系统定量类比分析方法。方法应用的关键是基准参数定量筛选和样本油田的定量筛选。

采收率是表征油藏开发效果的关键指标^[4],影响采收率的主要因素为地质特征、油田开发和采油技术。针对未开发油藏或处于开发初期油藏,影响采收率的因素主要是油藏地质特征,如油层物性参数、原油物性参数、地层条件等^[5]。因此,通过筛选一组相似度高、开发时间长的油田作为样本油田,统计分析这些样本油田的开发技术政策,如开发层系划分、布井方式和井网密度、地层压力保持方式及保持程度、开采工艺工程技术等,从而指导被类比油气田开展提高采收率研究。

研究采用灰关联方法,设定类比目标为采收率,类比参数包括油藏储层、流体参数、地层参数等,研究技术流程见图1。

1.1 基准参数定量筛选方法

通过单一因素分析法和多因素定量分析法定量确定类比基准参数^[6],减小因单一因素造成的片面性

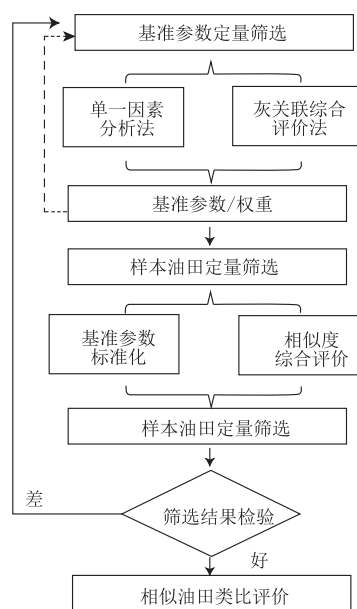


图1 多元多系统定量类比方法流程
Fig. 1 Flow of quantitative analogy method for multiple systems

以及因经验取值的主观性造成的类比偏差。

1.1.1 单一因素初步筛选

影响油田采收率的地质因素为圈闭类型、储集层性质、流体驱动类型、原油性质等^[7],采用二维关系图分析采收率和地质参数的相关性。如果曲线反映出两因素变化的态势基本一致或相反,则它们之间具有一定的相关性,以此初步确定相关性地质参数。根据相关研究成果^[4],不同圈闭类型油藏采收率存在明显差异,构造油藏相对最高,其次为断块油藏、岩性油藏,岩溶缝洞块状油藏采收率最低。针对碎屑岩储集层,含砾砂岩采收率相对最高,粉砂岩相对最低;储层渗透率越高,采收率越大,呈明显的正相关性。流体驱动类型以水驱类型采收率最好,溶解气驱最差。原油黏度对采收率影响重大,呈现较明显的负相关性^[8]。

1.1.2 灰关联方法定量筛选类比基准参数

为定量描述地质参数对采收率的敏感程度,引入灰关联理论^[9],用关联度来描述各参数间关系的强弱、大小和次序,灰关联度越大,说明该比较数列与参考数列的变化趋势越一致,或对参考数列的影响程度越大,反之影响程度也较小^[10]。为了便于类比分

析,删除权重较小的参数,重新确定关联度,最终确定基准类比参数^[11]。

1.2 油田相似度计算方法

根据确定的基准类比参数及权重,计算油田的相似度。在进行相似油田筛选时,将类比法的相似性与统计法的准确性有机结合^[12],经过三个步骤处理,筛选相似度高的油气田作为类比的样本油田:一是样本油田无因次化处理^[13];二是根据研究油田的油藏类型,确定参数阈值^[14],将被类比油田地质参数标定为“1”,不属于该油藏类型的参数被赋值0.05,油藏类型范围内参数,在[0.2 1]范围内分别按照正态分布进行标准化处理;三是权重加和,得出相似度综合评价指标。相似度越接近于1,则油田地质特征越相似,类比的最终开发指标可靠性越高^[15]。

设综合评价相似度为S, W_i 为各因素权重系数,则相似度计算公式为:

$$S=W_1P_{or}+W_2P_{er}+W_3API+W_4D_{ep}+W_5R_{og}+W_6T_{hk} \quad (1)$$

式中: P_{or} 为孔隙度,%; P_{er} 为渗透率, $10^{-3} \mu m^2$;API为原油重度,API° ($API^\circ=141.5/d-131.5$, d 为温度在15.6℃时的相对密度); D_{ep} 为油藏埋深,m; R_{og} 为气油比, m^3/t ; T_{hk} 为有效厚度,m。

相似度计算流程见图2。

2 定量类比方法在油田筛选中的应用

某研究油田属于高孔高渗中质原油砂岩油藏,油藏埋深518 m,油层厚度8 m,孔隙度33%,渗透率 $1500 \times 10^{-3} \mu m^2$,原油重度22°,气油比 $16 m^3/t$,设定类比目标为采收率,筛选与被类比油田相似的样本油田集合。

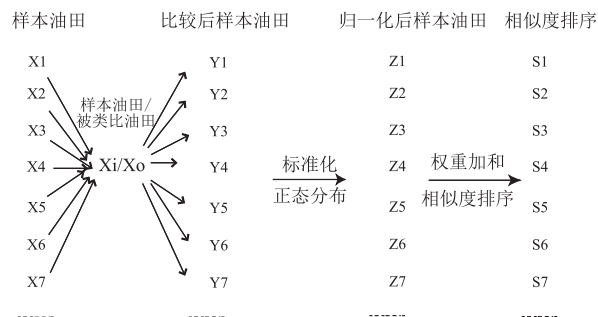


图2 样本油田相似度计算流程

Fig. 2 Flow of sample oilfield similarity calculation

2.1 基准参数确定

假设类比系统C,设基准参数共有N元,比较系统共有K个油田,应用德尔菲法初步确定采收率与地质参数的定性关系^[6],同时应用多元回归分析法,进一步统计分析地质参数与采收率的相关性。根据某数据库参数完整性特点,以孔隙性砂岩油藏为例,筛选与采收率具有相关性的参数(图3、图4)。油藏埋深、有效厚度、渗透率、孔隙度、原油重度、原油黏度、驱动能量、气油比、最终可采储量等。

应用灰关联方法^[16],进一步确定参数的权重系数。设定采收率为参考序列,比较序列为影响采收率的地质因素,计算关联系数、关联度以及各参数权重。

设参考序列采收率:

$$R_r=\{rf_1,rf_2,\dots,rf_n\} \quad (2)$$

比较序列样本油田:

$$C = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ P_{k1} & P_{k2} & \dots & P_{kn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

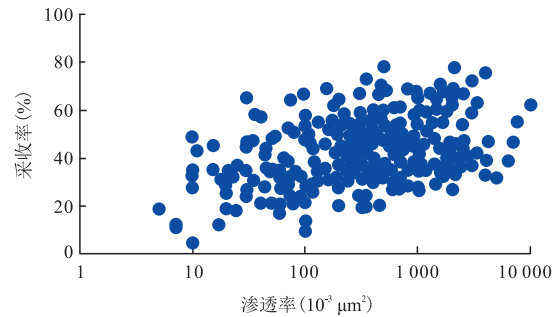


图3 渗透率与采收率的相关性

Fig. 3 Correlation between permeability and oil recovery

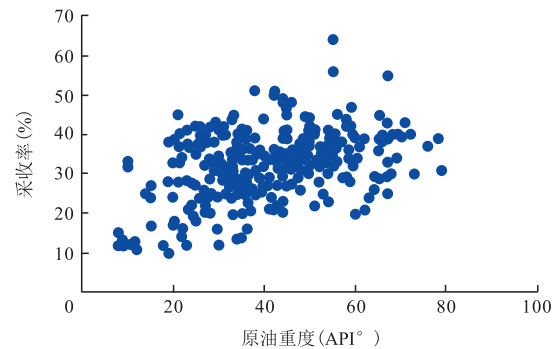


图4 原油重度与采收率的相关性

Fig. 4 Correlation between API gravity and oil recovery

计算关联度 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ (4)

式2—式4中: R_F 为采收率,%; f_k 为样本油田; p_{kn} 为第K个油田的第n个参数; $\sum_{n=1}^N r_n = 1$;R为关联度;r为各参数的关联度。

根据关联度大小,筛选确定6个基准参数分别为油藏埋深,孔隙度,渗透率、原油重度、气油比,油层厚度,参数权重分别为0.17,0.18,0.12,0.19,0.14,0.20(图5)。

2.2 样本油田筛选及类比结果

研究油田为普通稠油砂岩油藏,以表征原油性

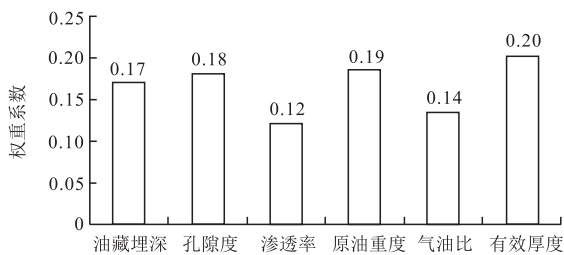


图5 普通稠油砂岩油藏基准参数权重

Fig. 5 Weight of benchmark parameters for common heavy oil sandstone reservoir

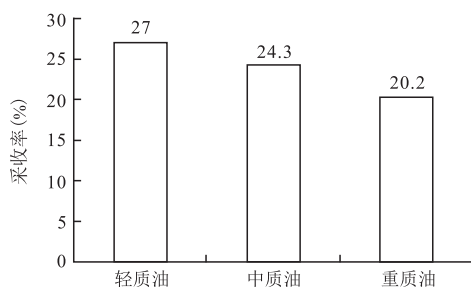


图6 不同原油性质与采收率关系

Fig. 6 Relation between different crude oil properties and oil recovery

质的参数为例说明参数标准化。根据油藏分类标准,原油重度大于31.1°以上为轻质原油,22.3°~31.1°为中质原油,10.0°~22.3°为重质原油,小于10.0°为超重油。根据中国石化砂岩油藏不同原油性质与采收率的关系(图6),不同原油性质的采收率幅度也不一样^[2]。

在进行归一化时,将研究油田的原油重度值设为1,样本油田原油重度大于31.1°和小于10.0°原油重度值设为0.05,其他样本油田原油重度值呈正态分布在0.2~1.0(图7)。根据参数权重加权和排序,筛选相似度大于0.8的20个油田作为类比样本油田。类比结果:该类型油藏最终采收率为37.8%。在二次采油阶段主要以注水开发方式为主^[17],其次为注气和天然气回注^[18],注水平均提高采收率13.9%,注气平均提高采收率为6.9%;转换开发方式方面^[19],采用蒸汽驱平均提高采收率26.5%,聚合物驱平均提高采收率9.0%。

2.3 检验

以研究油田为标准,分别以基准参数的0.9倍和1.1倍进行人工筛选样本油田,以相同样本数据量检

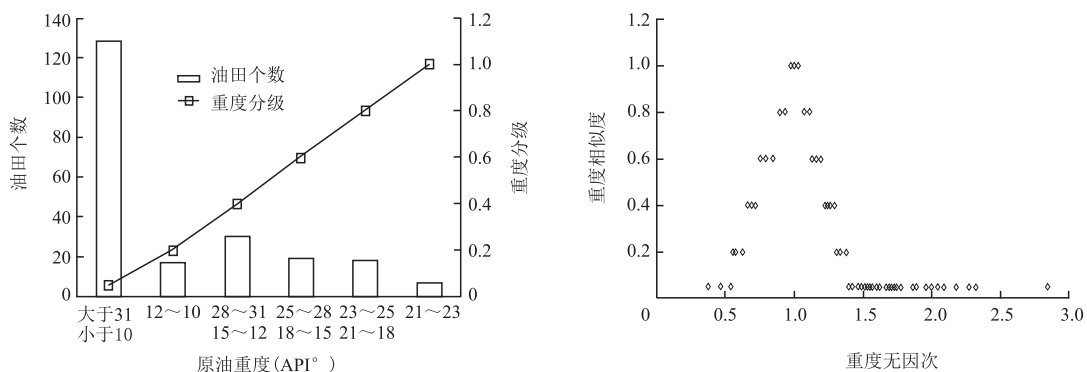
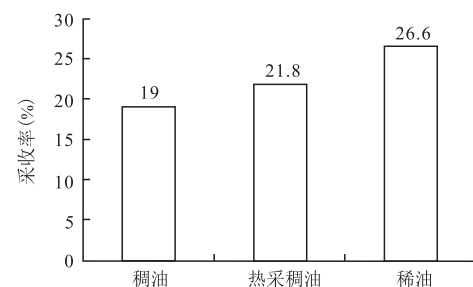


图7 原油重度归一化

Fig. 7 Normalization chart of API gravity

表1 方法1和方法2检验结果对比
Table 1 Comparison of test results of method-1
and method-2

| 检验 方式 | 筛选 方式 | 油藏埋深 (m) | 孔隙度 (%) | 渗透率 ($10^{-3}\mu\text{m}^2$) | 重度 (API°) | 气油比 (m^3/t) |
|----------|----------|-------------|------------|-----------------------------------|--------------|----------------------------------|
| 标准 | 1 | 749.5 | 3.9 | 1 818 | 3.4 | 33.3 |
| 偏差 | 2 | 1 300.2 | 7.0 | 2 179 | 6.0 | 112.2 |

验以上方法的可靠性,计算样本油田基准参数的平均值,标准偏差以及综合评价结果的标准偏差^[20]。设定量筛选为方法1,人工筛选为方法2。定量筛选的结果明显好于人工筛选,方法1的基准参数不论是平均值和标准偏差都好于方法2,特别是关键参数孔隙度和原油重度的标准偏差相差近一倍。方法1和方法2涉及的几个关键参数综合评价标准偏差分别为0.61,1.12,说明方法1筛选的样本油田与研究油田更加相似(表1)。

3 结论

1) 基于灰色关联和相似性的理论,建立了快速筛选相似油气田的定量类比的方法流程,确定了类比参数以及相关权重,类比筛选过程更注重客观性与相似筛选的物理意义。

2) 数据库的参数分布特点对筛选基准参数有一定的影响,该数据库渗透率中值为偏中高渗透,导致权重不敏感。因此,在实际应用中,需要结合油藏类型与概率分布相结合进行筛选:采用油藏参数阈值划分归一化范围,综合分析处理筛选类比样本油田,使样本油田与被研究油田在物理意义上保持一致,提高类比可靠性。

3) 该方法适用于孔隙性油藏,由于样本库参数的完整性,一些参数没有参与讨论,如储层非均质性、地层倾角等,但提供的研究方法适合所有的参数讨论。

参考文献

- [1] 李忠春,杨兆平,王天奇,等.美国SEC新准则下油气藏类比方法研究[J].特种油气藏,2014,21(4):113-115.
LI Zhongchun, YANG Zhaoping, WANG Tianqi, et al. Research on analogous methods under new American SEC rules[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(4): 113-115.
- [2] 丁祖鹏,田冀,张晓量.稠油油藏类比方法研究[J].特种油气藏,2013,20(4):102-105.
DING Zupeng, TIAN Ji, ZHANG Xiaoliang. Analogy method for heavy oil reservoirs[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2013, 20(4): 102-105.
- [3] 李斌,张欣赏,刘丹江.类比法定量模型及在油田开发中的应用[J].承德石油高等专科学校学报,2006,8(3):24-27.
LI bin, ZHANG Xinshang, LIU Danjiang. Application of analogy fix quantity model in exploration and exploitation in oilfields[J]. Journal of Chengde Petroleum College, 2006, 8(3): 24-27.
- [4] 游秀玲,张玲,罗云秀.原油采收率影响因素探讨及油藏综合分类[J].石油与天然气地质,2004,25(3):314-318.
YOU Xiuling, ZHANG Ling, LUO Yunxiu. Factors influencing oil recovery efficiency and comprehensive classification of oil reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(3): 314-318.
- [5] 袁自学,王靖云,李淑珣,等.特低渗透注水砂岩油藏采收率确定方法[J].石油勘探与开发,2014,41(3):341-348.
YUAN Zixue, WANG Jingyun, LI Shuxun, et al. A new approach to estimating recovery factor for extra-low permeability water-flooding sandstone reservoir[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(3): 341-348.
- [6] 袁希娟,龚耘.浅谈类比法[J].河北理工学院学报:社会科学版,2003,3(1):84-88.
YUAN Xijuan, GONG Yun. A brief study on the method of analogy[J]. Journal of Hebei Institute of Technology (Social Science Edition), 2003, 3(1): 84-88.
- [7] 计秉玉,王友启,张莉.基于地质储量结构变化的采收率演变趋势[J].石油与天然气地质,2020,41(6):1257-1262.
JI Bingyu, WANG Youqi, ZHANG Li. Research on overall recovery rate variations of dynamically changing OOIP[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(6): 1257-1262.
- [8] 周林碧,秦冰,李伟,等.国内外稠油降黏开采技术发展与应用[J].油田化学,2020,37(3):557-563.
ZHOU Linbi, QIN Bing, LI Wei, et al. Development and application of heavy oil viscosity reduction technology at home and abroad[J]. Oilfield Chemistry, 2020, 37(3): 557-563.
- [9] 曹明霞.灰色关联分析模型及其应用的研究[D].南京:南京航空航天大学,2007.
CAO Mingxia. Research on grey incidence analysis model and its application[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [10] 苏志欣.加权灰色关联理想解法在多属性决策中的应用研究——以洛带JP气藏增压开采方案技术经济评价为例[D].成都:成都理工大学,2007.
SU Zhixin. Research on the application of WGC-TOPSIS in multiple attribute decision-making: Taking Comprehensive evaluation on technology and economy of the JP Gas Pool's turbo-charged schemes in Luodai Natural Gas Field as a case [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007.
- [11] 宁宝权,陕振沛.基于改进熵和灰关联分析的模糊物元分析模型及应用[J].数学的实践与认识,2016,46(20):280-284.
NING Baoquan, SHAN Zhenpei. Fuzzy matter-element analysis model based on improved entropy and grey relational analysis and its application[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2016, 46(20): 280-284.
- [12] 邬光辉,吉云刚,赵仁德,等.一种油气资源量计算新方法及其应用[J].天然气地球科学,2007,18(1):41-44.
WU Guanghui, JI Yungang, ZHAO Rende, et al. A new method of oil and gas resource evaluation and its application in Tarim

- Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2007, 18(1): 41-44.
- [13] 王大星, 翟明清. 数据处理和建模方法在数学建模教学中的应用[J]. *北京教育学院学报: 自然科学版*, 2014, 9(1): 5-10.
WANG Daxing, ZHAI Mingqing. Application of data processing and modeling method in mathematical modeling teaching[J]. *Journal of Beijing Institute of Education (Natural Science Edition)*, 2014, 9(1): 5-10.
- [14] 刘舒野. 模糊聚类分析方法在油藏分类中的应用研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2007.
LIU Shuye. The application research of fuzzy cluster analysis method in reservoir classification[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2007.
- [15] 吕远. 水驱油藏单井控制可采储量影响因素定量研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2010.
LYU Yuan. Quantitative study of water drive recovery single well controlled recoverable reserve[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2010.
- [16] 柳广弟, 喻顺, 孙明亮. 海相碳酸盐岩层系油气资源类比评价方法与参数体系——以塔里木盆地奥陶系为例[J]. *石油学报*, 2012, 22(S2): 125-134.
LIU Guangdi, YU Shun, SUN Mingliang. Methods and parameter systems for analog assessment of petroleum resources in marine carbonate strata: A case study of the Ordovician in Tarim Basin, China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 22(S2): 125-134.
- [17] 罗义科, 张俊廷, 张彩旗, 等. 渤海稠油注水开发油田提高采收率技术研究[J]. *长江大学学报: 自然科学版*, 2016, 13(29): 59-63.
LUO Yike, ZHANG Juntong, ZHANG Caiqi, et al. Technology of enhance oil recovery in heavy oil reservoir of water flooding development in Bohai Area[J]. *Journal of Yangtze University (Natural Science Edition)*, 2016, 13(29): 59-63.
- [18] 孙焕泉, 王海涛, 吴光焕, 等. 稠油藏注CO₂提高采收率影响因素研究[J]. *石油实验地质*, 2020, 42(6): 1009-1023.
SUN Huanquan, WANG Haitao, WU Guanghuan, et al. CO₂ EOR factors in heavy oil reservoirs[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(6): 1009-1023.
- [19] 申乃敏, 张连锋, 张小静, 等. 普通稠油油藏聚合物驱技术应用——以古城油田泌125区块为例[J]. *石油地质与工程*, 2020, 34(4): 60-63.
SHEN Naimin, ZHANG Lianfeng, ZHANG Xiaojing, et al. Application of polymer flooding technology in conventional heavy oil reservoir: By taking Bi125 block of Gucheng oilfield as an example[J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2020, 34(4): 60-63.
- [20] 杜渊, 秦懿. 实验标准偏差和算术平均值实验标准偏差的差别辨析和应用分析[J]. *计量与测试技术*, 2014, 41(11): 8-9.
DU Yuan, QIN Yi. The difference discrimination and application analysis of experimental standard deviation of the average value of the experimental standard deviation and count [J]. *Metrology and Measurement Technique*, 2014, 41(11): 8-9.
- (编辑 尹淑容)

(上接第759页)

- rocks, Taupo Volcanic Zone, New Zealand[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2014, 288: 76-93.
- [13] FROLOVA J, LADYGIN V, RYCHAGOV S, et al. Effects of hydrothermal alterations on physical and mechanical properties of rocks in the Kuril - Kamchatka island arc[J]. *Engineering Geology*, 2014, 183: 80-95.
- [14] HE S, LIANG L X, ZENG Y J, et al. The influence of water-based drilling fluid on mechanical property of shale and the wellbore stability[J]. *Petroleum*, 2016, 2(1).
- [15] 刘厚彬, 张帆, 孟英峰, 等. 焦石坝地区页岩气水平钻井井壁稳定性实验研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2017, 13(6): 1531-1536.
LIU Houbin, ZHANG Fan, MENG Yingfeng, et al. Experimental study on shale gas horizontal wellbore stability in Jiaoshiba area[J]. *Journal of Underground Space and Engineering*, 2017, 13(6): 1531-1536.
- [16] 刘向君, 罗平亚. 测井在井壁稳定性研究中的应用及发展[J]. *天然气工业*, 1999(6): 33-35.
LIU Xiangjun, LUO Pingya. Application and development of logging in wellbore stability research[J]. *Natural Gas Industry*, 1999(6): 33-35.
- [17] 丁乙, 刘向君, 罗平亚, 等. 硬脆性泥页岩地层井壁稳定性研究[J]. *中国海上油气*, 2018, 30(1): 142-149.
DING Yi, LIU Xiangjun, LUO Pingya, et al. Study on the stability of hard and brittle shale formation wall[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2018, 30(1): 142-149.
- [18] 高志勇, 冯佳睿, 周川闽, 等. 干旱气候环境下季节性河流沉积特征——以库车河剖面下白垩统为例[J]. *沉积学报*, 2014, 32(6): 1060-1071.
GAO Zhiyong, FENG Jiarui, ZHOU Chuanmin, et al. Sedimentary characteristics of seasonal rivers in an arid climate environment: A case study of the Lower Cretaceous in the Kuqa River profile[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(6): 1060-1071.
- [19] 贾彪, 邓明毅, 罗淑红, 等. 鄯善、丘陵、温吉桑、米登构造岩石矿物组分和理化性能及钻井液技术的研究[J]. *西安石油学院学报(自然科学版)*, 1994(S1): 57-67.
JIA Biao, DENG Mingyi, LUO Shuhong, et al. Study on the mineral composition, physical and chemical properties and drilling fluid technology of rock formations in Shanshan, Qiuling, Wenjisang and Midang[J]. *Journal of Xi'an Petroleum Institute (Natural Science Edition)*, 1994(S1): 57-67.
- [20] 刘厚彬, 崔帅, 朱达江, 等. 硬脆性页岩微观组构及力学性能研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2019, 15(S1): 34-39.
LIU Houbin, CUI Shuai, ZHU Dajiang, et al. Study on Microstructure and Mechanical Properties of Hard Brittle Shale [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2019, 15(S1): 34-39.
- (编辑 常燕)