

海外油气田开发新项目储量评价方法

王鸣川, 商晓飞, 段太忠, 高蔚原

(中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要: 储量评价是海外油气田开发新项目资产价值评价的核心, 决定了海外油气田开发新项目的投资收益和开发方案的制定。为合理快速评价海外新开发油气田储量, 并为开发方案的制定提供基础地质模型, 以地质建模为手段, 建立海外新开发油气田储量评价方法和流程。基于地质建模的海外油气田开发新项目储量评价包括资料收集、地质格架评价、储层相和属性评价、储量计算与风险评价 4 大环节, 可分为地质建模和储量评价 2 个阶段。地质建模阶段在资料收集的基础上, 对最可能的构造、储层相和属性分布进行三维建模。储量评价阶段再依据对储层的不确定性的认识, 开展地质格架、储层相和属性分布的不确定性研究, 建立开发新项目的概率储量分布, 暴露海外油气田开发新项目的储量风险, 实现海外开发新项目储量的快速科学评价。基于地质建模的海外油气田开发新项目储量评价方法, 有效融合了容积法和概率法的优点, 应用实例表明该方法具有较好的实用性, 可推广应用于海外油气田储量评价中。

关键词: 概率储量; 储量计算; 不确定性; 地质建模; 风险评价; 海外油气田

中图分类号: TE19

文献标识码: A

Reserves evaluation for new investment projects in overseas oil and gas field development

WANG Mingchuan, SHANG Xiaofei, DUAN Taizhong, GAO Weiyuan

(SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China)

Abstract: Reserve evaluation is the core of asset value evaluation of new investment projects in overseas oil and gas field development and determines the investment income and formulation of a development plan. A method of reserve evaluation was established by using geological modeling in order to reasonably and quickly evaluate the reserves of new investment projects in overseas oil and gas field development, and to provide a basic geological model for the formulation of a development plan. The evaluation consists of data collection, geological framework evaluation, reservoir facies and properties evaluation, and reserve calculation and risk assessment. It can be divided into two stages: geological modeling and reserve evaluation. The geological modeling stage includes three-dimensional modeling of the most probable structures, reservoir facies and properties based on data collection. In the reserve evaluation stage, the uncertainty of the geological framework, reservoir facies and properties are carried out based on the understanding of reservoir uncertainty, then the probabilistic reserve distribution is obtained and the risk of reserve is exposed. Finally, the rapid scientific reserve evaluation of the new investment projects of overseas oil and gas field development is realized. The reserve evaluation method for new investment projects of overseas oil and gas field development based on geological modeling effectively integrates the advantages of volume method and probability method, and the application example shows that the method is practical and can be applied to the reserve evaluation of overseas oil and gas fields.

Key words: probabilistic reserve; reserve calculation; uncertainty; geological modeling; risk assessment; overseas oil and gas field

油气储量是油气田开发的物质基础, 是油气资源投资的核心资产, 拥有更多的海外油气储量和产量是我国石油资源战略的重要组成部分^[1-3]。但海外油气田开发新项目储量评价受资料完备性限

制, 如资料少、井控程度低(只有少量探井和评价井)、资料品质不高、油藏认识程度不高等, 导致储量计算结果的不确定性大, 给油气资产的价值评价带来较大的风险。而且海外油气田开发新项目储

收稿日期: 2019-08-29; 修订日期: 2020-02-22。

作者简介: 王鸣川(1985—), 男, 博士, 副研究员, 从事储集层建模与油藏数值模拟研究。E-mail: wangmc.syky@sinopec.com。

通信作者: 段太忠(1961—), 男, 博士, 国家“千人计划”特聘专家, 从事储层表征与建模研究。E-mail: duantz.syky@sinopec.com。

基金项目: 国家青年基金项目(41702359)和国家科技重大专项(2016ZX05033-003-002)联合资助。

量评价涉及多个学科,综合性强,并且往往评价的时间短,时效性要求高,因此,急需一种快速合理的储量评价方法和流程。海外油气田开发新项目常采用容积法和概率法进行储量评价。容积法以估算的储量计算所需参数的平均值为基础,根据储量计算公式,计算得到一个确定的储量值;概率法则在容积法的基础上,引入储量计算参数的变化范围,采用蒙特卡洛方法提取参数值多次计算储量,得到海外开发新项目的概率储量。容积法和概率法为快速进行海外油气田开发新项目储量评价提供了简单实用的方法,但随着技术进步,上述方法的不足日益显现。容积法得到的单一确定的储量值无法暴露储量评估中的不确定性,而概率法虽能在数值上提供多个储量和储量的风险范围,但难以暴露储量评价的真正风险,而且无法提供与之对应的地质模型供后期油藏开发使用。近年来,中国石油公司大范围参与国际油气竞争^[4-5],高度重视海外油气田开发新项目的储量和风险。笔者以前期大量的海外油气田开发新项目储量评价的工作为基础,并结合目前跨国石油公司的做法,综合容积法和概率法进行储量评价的优点,形成基于地质建模的海外油气田开发新项目储量评价方法,对海外油气田开发新项目的储量进行评价,并与国际接轨。

1 开发新项目储量评价基础

油气储量评价的基础是油气储量的定义与储量计算的基本公式。油气储量指油气藏中油气的总储藏量,是在油气田勘探、开发各个阶段中,利用取得的油气藏静态和动态资料,采用一定的计算方法得到的油气藏地质储量。尽管不同的国家和地区对储量的分类标准不同,但对地质储量的计算并无影响。对于海外油气田开发新项目的储量计算,无论是容积法还是概率法,其基本的储量计算公式为油气的体积计算公式。以石油的储量计算公式为例,其储量计算公式如下:

$$OOIP=A \cdot h \cdot NTG \cdot \phi(1-S_{wi})/B_o \quad (1)$$

式中:OOIP为原始石油地质储量, m^3 ; A为含油面积, m^2 ; h为圈闭厚度, m; NTG为净毛比, f; ϕ 为孔隙度, f; S_{wi} 为原始含油饱和度, f; B_o 为原油体积系数, f。

2 开发新项目储量评价流程和方法

2.1 储量评价流程

海外油气田开发新项目一般只钻完部分勘探

井和评价井,收集了一些测井、地质和地震等资料,少数油气田有少量的测试资料,并在此基础上做了一定程度的地质格架和储层研究。海外油气田开发新项目储量评价的实践表明,由于数据量少,基于已有资料产生的认识往往与油藏实际有一定的差别,导致最终的储量有较大差异。在大量新项目储量评价的工作实践基础上,根据地质建模和储量评价的流程^[6-8],参考国际石油公司成熟的模式,提出并形成了基于地质建模的海外油气田新项目储量评价方法和流程(图1),有效提高了储量评价的效率,明确了油气资源的风险,为新项目的后续开发管理和风险管理奠定了基础。

在具体的储量评价过程中,以中东某碳酸盐岩油藏为原型,利用有限的静、动态资料,采用两步法建立地质模型并进行储量评价。首先根据已有资料得到的认识,建立基础地质模型;再根据不确定性研究结果,进行储量评价,得到储量的分布区间与概率。

2.2 基础地质模型建立方法

对于海外油气田开发新项目,地质建模的主要目的是将现有资料基础上的储层分布和流体分布认识定量化、可视化,并为储量计算和后续的开发方案设计提供基础地质模型。

基础地质模型的建立主要包括资料收集、构造建模、相建模和属性建模4个步骤。在资料收集过程中,需收集所有的动静态资料,可按照数据来源分门别类进行收集。由于海外油气田的特殊性^[9],需要对数据的来源、质量和一致性进行严格检查。

2.2.1 构造模型建立方法

地质格架决定了地质模型的空间范围和总的岩石体积,对后期储量的计算具有决定性作用,因此,对于海外油气田开发新项目,构造建模的质量

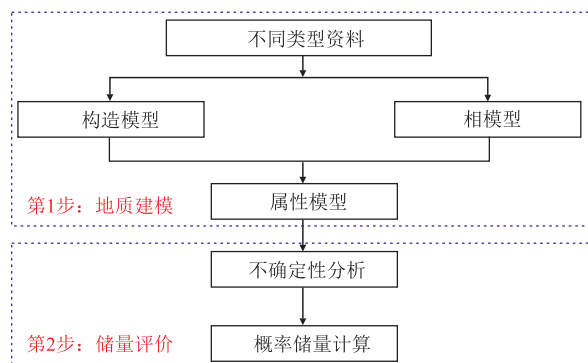


图1 海外油气田开发新项目储量评价流程

Fig.1 Reserve evaluation process for new investment projects of overseas oil and gas field development

必须引起高度重视。构造建模包括断层建模和层面建模。断层建模通过地震等获取的断层线和断层柱,井上获取的断点,构造图获取的断层参数(包括断层类型、产状、发育层位、断层间接触关系等),采用插值方法,建立能够真实反映断层系统的断层模型。层面建模通过地震解释的层面数据(一般为关键层面),结合地质分层数据,建立层面模型。然后将叠合的层面模型与断层模型耦合,建立构造模型。最后对构造模型进行质量检查,并根据出现的问题对构造模型进行适当的修正。

2.2.2 相模型建立方法

相模型对油气藏的属性分布具有控制作用^[8]。但海外油气田开发新项目只有少量的勘探井和评价井,基于地震资料的储层认识精度低、不确定性高,往往只能结合区域地质认识,划分新项目所在油气区块的沉积相或储层的平、剖面展布。甚至有些开发新项目只能根据储层物性的相对质量,简单划分储层的分区。对于海外油气田开发新项目的相建模,平面相分布应参考相邻地区类似沉积环境成熟区块的发育特征,并结合有限的地质综合分析结果和地震研究结果进行确定;垂向相分布主要参考井数据分析结果,并根据垂向储层分布认识适当调整。相建模方法根据不同海外油气田开发新项目的沉积环境,主要采用序贯指示模拟方法或基于目标模拟等常用成熟的方法。由于相模型对属性模型具有控制作用,应对相模型进行质量控制,使相模型中相的分布与地质模式具有一致性。

2.2.3 属性模型建立方法

属性建模主要包括孔隙度、渗透率、饱和度和净毛比模型的建立。海外油气田开发新项目井少、井距大,井控程度低,基于井数据的统计规律难以表征油气藏属性的非均质性,地震数据限于研究程度通常难以直接作为属性分布的依据。因此,属性的平面分布应尽量利用相模型进行适当约束,其纵向分布主要参考井数据的统计特征,同时,参考类似区块属性发育特征的研究结果,采用其他地质参数进行必要的约束,如构造等。孔隙度模型一般在相模型的约束下,采用序贯高斯随机模拟方法建立,对于渗透率、饱和度和净毛比,可根据实际情况,采用确定性建模方法,建立其三维分布模型。

2.3 储量评价方法

储量是油气勘探开发的核心目标,是决定海外油气投资最基础的数据,也是海外油气田开发新项目最重要的指标。因此,在地质建模的基础上进行储量评价时,应对储量有影响的相关环节进行不确

定性分析,以充分暴露海外油气田开发新项目可能存在的储量风险,为决策者提供依据。

2.3.1 不确定性因素分析方法

不确定性虽非油气藏的固有属性,但却是储量评价不可回避的问题。虽然在建模之前的资料收集阶段,建模人员根据资料情况与对应学科人员进行了充分的核实与论证,但由于油气藏的复杂性和认识难度,在构造、相和属性建模阶段,依然存在较大的不确定性^[10-11]。因此,在储量评价之前,需对各不确定性因素进行分析与量化。

在成熟油气田开发过程中,通常不考虑构造的不确定性。但在海外油气田开发新项目中,井间层面的位置受地震资料品质及其解释等多种因素的影响,其分布符合某个深度区间(图2),应根据解释的构造面作为基础面,并分层为约束数据,随机生成对应于每个“模拟实现”(一个模拟实现为一个完整的地质模型)的构造面。

对于一些具有油、气、水接触界面的油气藏,如中东的X油藏,结合测井解释、MDT等测试资料分析,能够得到其油藏的油底和底水的水顶,而储量计算所需的油水界面介于二者之间。因此,应根据油水界面的可能位置,通过随机方法或均匀分布方法,使每个流体界面都能参与储量的计算。

海外油气田开发新项目的相模型应根据地质综合研究得到的定性的相分布模式或最可能的相分布图,采用序贯指示模拟方法建立基础的相模型,再根据对油气藏不同的理解,改变相建模的相关参数,得到不同情形下的相模型。

油气藏属性(如孔隙度、渗透率、饱和度和净毛比)的分布不仅受到相模型的控制,还受到建模过程中属性建模参数设置的影响。不同的相模型,同一个相约束的属性,其建模参数,如种子数、变差函数等的设置不同,模拟结果便不同。在相模型的约束下,改变属性建模参数,得到多个不同的属性模型“实现”。

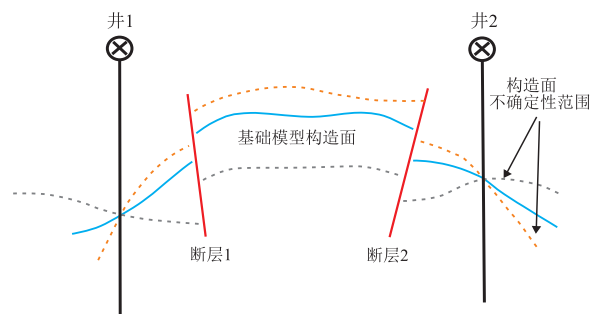


图2 井间层面不确定性示意

Fig.2 Uncertainty schematic diagram of interwell horizon

2.3.2 储量计算与评价

在不确定性分析的基础上,对应于每个不确定性因素的每一个可能取值,都会产生一个与其对应的地质模型。计算每个地质模型的储量,便可得到对应的储量列表,即概率储量。储量的风险以概率储量的形式呈现^[12-14]。而根据地质综合研究和统计分析得到的最有可能的构造、相和属性分布参数建立的模型称为基础模型,通常作为不确定性分析的基础。

通过概率储量分布,可得到海外油气田开发新项目的储量区间、平均储量和不同概率下的储量值。同时,根据不确定性因素参数的取值与储量的对应关系,可以得到不确定性因素对储量的影响程度,综合评价二者的关系,结合各储量影响因素的风险程度,即可判断储量的风险。

3 应用实例

中东 X 油田位于 Zagros 盆地,面积约 270 km²,已完钻 2 口勘探井和 2 口评价井。工区内发育 2 条逆断层,目标层为碳酸盐岩台地沉积,岩性为厚层的灰岩和白云质灰岩。目标层纵向上细分为 3 个储层段。目前油田处于开发评价阶段,只有 1 口井的试井数据。

3.1 基础地质模型

X 油田收集到 4 类资料,分别是:区域层序、沉积储层资料,目标层顶部标志层特征,4 口井的测井曲线,部分工区的三维地震资料。根据区域层序和沉积环境,结合工区内测井曲线特征,将目标层划分为 3 个储层段,并将储层划分为 3 类岩石物理相。井震联合建立工区构造模型,再以井数据为硬数据,采用序贯指示模拟方法建立三维岩石物理相模型。属性模型以井数据为基础采用“相控”建模方法建立,其中孔隙度模型采用序贯高斯模拟方法建立,渗透率模型根据不同岩石物理相下的孔渗关系式采用确定性方法建立(图 3),饱和度模型以构造深度和孔隙度模型约束采用序贯高斯模拟方法建立。孔隙度高于 2% 且含水饱和度低于 40% 作为有效厚度的截断值。采用油底和水顶的均值作为基础模型的流体界面。计算得到工区的储量为 7.366×10⁸ bbl。

3.2 不确定性因素分析

根据前期的地质综合分析和统计分析,结合 X 油田的资料和勘探开发实际,选取了目前对储量计算影响最大的 5 个因素(构造、油水界面、相比比例、孔隙度和饱和度)进行不确定性分析,并确定 5 个

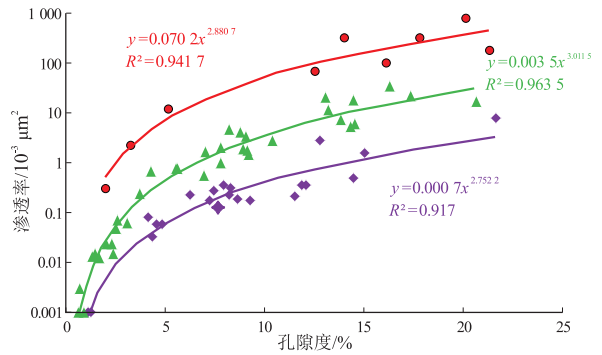


图 3 中东 X 油田不同岩石物理相控制的孔渗交会图

Fig.3 Correlation of porosity and permeability under different petrophysical facies of X oilfield in Middle East

因素取值的变化范围。

对于 X 油田,受限于地震资料的分辨率,若设置一口盲井,地震解释的层面在井点处会产生一定幅度的变化,其变化范围为-30~30 m。因此,以层面的偏差为随机变量,井点分层为约束数据,将会产生对应于每次地质模型实现的一系列的地质层面,反映构造面的不确定性(图 4)。

根据钻遇油水界面的 3 口井的测井解释水顶和油水层的压力资料,确定 X 油田的油水界面。但由于资料较少,且不同井的测井解释流体界面有差异,以-3 705 m(海拔)为油水界面基础值,以综合解释得到的油底(海拔-3 690 m)和水顶(海拔-3 725 m)为变化范围,反映流体界面的不确定性对储量的影响。

X 油田 4 口井均分布于构造的高部位,且只有 3 口井具有较为完整的测井曲线可供储层相研究。因此,采用基于 3 口井所得到的岩石物理相来代表全油田的储层发育情况,具有较大的不确定性。并且,岩石物理相的比例变化会直接影响储层的有效厚度和有效体积,进而影响储量计算。设置 3 种岩石物理相比例的变化范围为±10%,来反映储层及相控的孔隙度和饱和度对储量计算的影响。

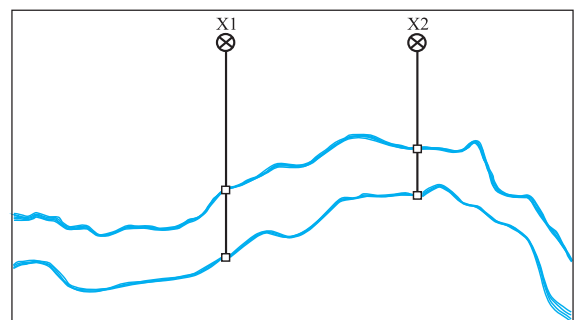


图 4 中东 X 油田不同模拟实现的构造面示意

Fig.4 Structural surfaces of different realizations of X oilfield in Middle East

对于 X 油田的储量计算而言,属性模型中的孔隙度和饱和度不仅直接影响储量值(由于其截断值是储层和非储层的区分标准),而且间接影响储层与非储层的变化,进一步影响基于地质模型的储量计算。在对孔隙度和饱和度的敏感性分析过程中,通过改变其变差函数的变程,来反映二者对储量计算的影响。在基础模型中,二者的平面变差函数主次变程分别设置为 5 000 m 和 3 000 m,根据盆地和相邻区块的认识,设置主变程的范围为 3 000~6 000 m,设置次变程的范围为 1 500~4 000 m。

为了快速分析主要储量参数对储量计算的影响,本次研究采用均匀采样方法,对每个参数在其可能取值范围内均进行了 50 次随机模拟,获取每次实现的储量,最终得到各参数变化对储量的影响程度图(图 5)。储量影响程度表明,对于海外油气田开发新项目,构造与流体界面对储量影响最大,在对类似项目进行评价时,应高度重视构造与流体界面等认识的可靠性。

3.3 储量评价

考虑计算机的计算能力,在各不确定参数的允许取值范围内,通过蒙特卡罗(Monte-Carlo)采样方法,进行了 200 次随机模拟,得到 200 个地质模型实现,并得到地质储量的概率分布(图 6)。通过概率储量分布,得到保守的地质储量(P90 储量)为 6.567×10^8 bbl,最可能的地质储量(P50 储量)为 7.159×10^8 bbl,乐观的地质储量(P10 储量)为 8.018×10^8 bbl。基础模型(base case)的地质储量为 7.366×10^8 bbl,与最可能储量仅相差 2.89%,可作为地质评价和后续开发方案设计的参考模型。

4 结论

(1)海外油气田开发新项目储量评价中,各储

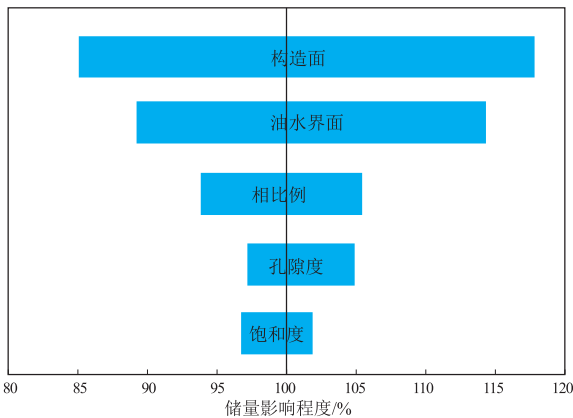


图 5 中东 X 油田不确定性因素对储量的影响程度

Fig.5 Influence of uncertainties on reserves of X Oilfield in Middle East

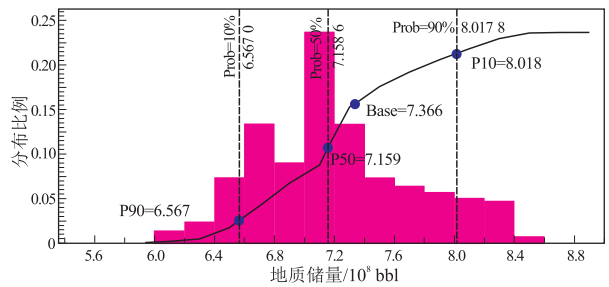


图 6 中东 X 油田概率储量分布

Fig.6 Probabilistic reserve distribution of X Oilfield in Middle East

量计算参数存在较大的不确定性,给储量计算带来潜在风险,需定量评价各参数对储量的影响程度,为决策者提供依据。

(2)在大量海外油气田开发新项目储量评价的经验基础上,以中东 X 油田为原型,提出了基于地质建模的海外油气田开发新项目储量评价方法。该方法融合了容积法和概率法的优点,通过地质建模手段,整合多学科、多尺度数据,能够快速合理地对海外油气田开发新项目进行储量评价,暴露可能存在的储量风险。

(3)中东 X 油田的储量评价表明,限于海外新开发油气田的资料及油藏认识程度,构造和流体界面的不确定性对储量计算的影响最大,在海外新开发油气田的评价中,需高度重视构造与流体界面的研究,以降低资产风险。

致谢:感谢中国石化石油勘探开发研究院苏俊磊博士提供了图 3 所需的数据。

参考文献:

[1] 申本科,王雁刚,李军,等.海外油气田新项目储量评估中的储层参数研究[J].中国石油勘探,2012,17(1):51-57.
SHEN Benke,WANG Yangang,LI Jun,et al.Reservoir parameter study about reserves evaluation of new overseas oil and gas projects[J].China Petroleum Exploration,2012,17(1):51-57.

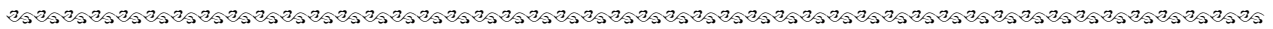
[2] 郭睿,原瑞娥,张兴,等.海外油气田开发新项目评价方法研究[J].石油学报,2005,26(5):42-47.
GUO Rui,YUAN Ruie,ZHANG Xing,et al.Evaluation method for new investment projects of overseas oil-gas field development[J].Acta Petrolei Sinica,2005,26(5):42-47.

[3] 李朝霞,夏海容,吕彦平.海外油气储量评估方法研究[J].复杂油气藏,2014(2):37-41.
LI Zhaoxia,XIA Hairong,LÜ Yanping.Study on the evaluation method of overseas oil-gas reserves[J].Complex Hydrocarbon Reservoirs,2014(2):37-41.

[4] 童晓光.跨国油气勘探开发研究论文集[M].北京:石油工业出版社,2015.
TONG Xiaoguang.A collection of research papers on interna-

- tional oil and gas exploration and development [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2015.
- [5] 童晓光, 窦立荣, 田作基. 21 世纪初中国跨国油气勘探开发战略研究 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
- TONG Xiaoguang, DOU Lirong, TIAN Zuoji. Strategic research on China's overseas oil and gas exploration and development in the early 21st century [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [6] PYRCZ M J, DEUTSCH C V. Geostatistical reservoir modeling [M]. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2014.
- [7] 吴胜和. 储层表征与建模 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
- WU Shenghe. Reservoir characterization & modeling [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.
- [8] 段太忠, 王光付, 廉培庆, 等. 油气藏定量地质建模方法与应用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2019.
- DUAN Taizhong, WANG Guangfu, LIAN Peiqing, et al. Quantitative reservoir modeling method and its application [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2019.
- [9] 穆龙新, 范子菲, 许安著. 海外油气田开发特点、模式与对策 [J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 690-697.
- MU Longxin, FAN Zifei, XU Anzhu. Development characteristics, models and strategies for overseas oil and gas fields [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 690-697.
- [10] YAMAMOTO J K, KOIKE K, KIKUDA A T, et al. Post-processing for uncertainty reduction in computed 3D geological models [J]. Tectonophysics, 2014, 633: 232-245.
- [11] CAERS J. Modeling uncertainty in the earth sciences [M]. Chichester: Wiley-Blackwell, 2011.
- [12] SCHUYLER J R. Probabilistic reserves lead to more accurate assessments [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans, Louisiana: SPE, 1998.
- [13] CAPEN E C. Probabilistic reserves! Here at last? [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2001, 4(5): 387-394.
- [14] 张明禄, 王家华, 卢涛. 应用储层随机建模方法计算概率储量 [J]. 石油学报, 2005, 26(1): 65-68.
- ZHANG Minglu, WANG Jiahua, LU Tao. Calculation of probabilistic reserves of reservoir with stochastic modeling method [J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(1): 65-68.

(编辑 徐文明)



(上接第 295 页)

- [7] 梁文华, 昌参 2 井九佛堂组原油的地球化学特征及油源对比 [J]. 新疆石油学院学报, 2003, 15(4): 22-25.
- LIANG Wenhua. Geochemical characteristics and oil-source rock correlation of Jiufotang Formation oil in well Changcan 2 [J]. Journal of Xinjiang Petroleum Institute, 2003, 15(4): 22-25.
- [8] 宋长玉, 金洪蕊, 刘璇, 等. 烃源岩中甲基菲的分布及对成熟度参数的影响 [J]. 石油实验地质, 2007, 29(2): 183-187.
- SONG Changyu, JIN Hongrui, LIU Xuan, et al. Distribution of methyl phenanthrene in sediments and its impacting on maturity parameters [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(2): 183-187.
- [9] RADKE M, WELTE D H. The methylphenanthrene index (MPI): a maturity parameter based on aromatic hydrocarbons [M]//BJORØY M, ALBRECHT P, CORNFORD C, et al. Advances in Organic Geochemistry 1981. Chichester: John Wiley and Sons Incorporation, 1983: 504-512.
- [10] 倪春华, 包建平, 梁世友. 渤海湾盆地渤中凹陷原油成熟度的多参数综合评价 [J]. 石油实验地质, 2009, 31(4): 399-402.
- NI Chunhua, BAO Jianping, LIANG Shiyu. Overall evaluation by multi-parameters on maturity of crude oil from the Bozhong Sag, the Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2009, 31(4): 399-402.
- [11] 侯读杰, 张林晔. 实用油气地球化学图鉴 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 92.
- HOU Dujie, ZHANG Linye. Practical petroleum geochemical map [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 92.
- [12] PETERS K E, MOLDOWAN J M. Guide for the application of biological markers [M]. London: Prentice-Hall, 1993: 79-187.
- [13] SCALAN E S, SMITH J E. An improved measure of the odd-even predominance in the normal alkanes of sediment extracts and petroleum [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1970, 34(5): 611-620.
- [14] 任军虎, 王万春, 康晏. 有机地球化学指标的分析 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2006, 25(3): 266-271.
- REN Junhu, WANG Wanchun, KANG Yan. The analysis of organic geochemistry indexes [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2006, 25(3): 266-271.
- [15] MACKENZIE A S, MAXWELL J R, COLEMAN M L, et al. Biological marker and isotope studies of North Sea crude oils and sediments [C]//Proceedings of the 11th World Petroleum Congress. London: World Petroleum Congress, 1983: 45-56.
- [16] SEIFERT W K, MOLDOWAN J M. Use of biological markers in petroleum exploration [M]//JOHNS R B. Methods in Geochemistry and Geophysics. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier, 1986, 24: 261-290.

(编辑 黄娟)