

一种用于油气勘探目标评价的钻后评估方法

王义刚, 盛秀杰, 杨双, 曹晋
中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206

摘要: 钻后评估是油气资源勘探过程中勘探目标评价活动的重要环节, 通过钻前预测与钻后结果对比分析, 总结经验, 对钻前评价与预测工作中的不足进行不断校正和完善, 使勘探目标的钻前评价和预测结果更加准确, 进而提高下一步油气勘探的成功率。在介绍钻后评估主要内容和方法的基础上, 总结钻后评估中需要重点关注的问题和解决方法。研究认为, 在钻后评估中通过分析钻探成功目标和失败目标的地质风险评价结果及资源量计算参数预测结果, 比较钻前预测和钻后估算产生较大偏差的关键要素, 分析产生偏差的原因并在后续评价中进行重点改进, 在提高后续勘探成功率, 有效提升地质勘探人员勘探目标钻前评价和钻前预测能力方面有着重要意义。

关键词: 油气资源评价; 钻前预测; 钻后评估; 地质风险; 勘探目标评价

中图分类号: TE132.1

文献标识码: A

Method of post-drilling assessment for the prospect evaluation of petroleum exploration

WANG Yigang, SHENG Xiujie, YANG Shuang, CAO Jin

Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China

Abstract: Post-drilling evaluation is an important part of prospect evaluation in the oil and gas exploration processes. With the comparative analysis of pre-drilling prediction and post-drilling results, the experience is summarized, and the deficiencies in pre-drilling evaluation and prediction are corrected and improved, so that the pre-drilling evaluation and prediction results of exploration targets are more accurate, and the success rate for the coming oil and gas exploration can be improved. Based on introducing the main contents and methods of post-drilling evaluation, the problems and solutions that need to be focused on in post-drilling evaluation are summarized in this paper. By analyzing the geological risk factors and reserve parameters of both successful and failed drilling, the key elements of large deviation between pre-drilling prediction and post-drilling estimation are compared, and the causes for the deviation are discussed and improved, which can be helpful on improving the geological explorers' ability of prediction and enhancing the success ratio of exploration in the following work.

Key words: oil and gas resource evaluation; pre-drilling prediction; post-drilling assessment; geological risk; prospect evaluation

勘探目标油气资源评价过程是一个动态的循环过程^[1], 其评价过程和评价内容包括地质风险分析、油气资源量评价、经济评价、预探井钻探、钻探结果评估分析, 在钻探结果评估分析的基础上, 利用钻探反馈的信息重新对待钻和待评价的勘探目标进行重新评价(图 1)。随着钻探井数的增加, 通过钻后评估反馈的信息越来越多, 后期勘探评价可供参考的信息也不断增加, 在此基础上进行勘探目标评价有助于规避干井风险, 提高勘探成功的概率。因此, 钻后评估在勘探目标评价中具有非常重

要的作用。

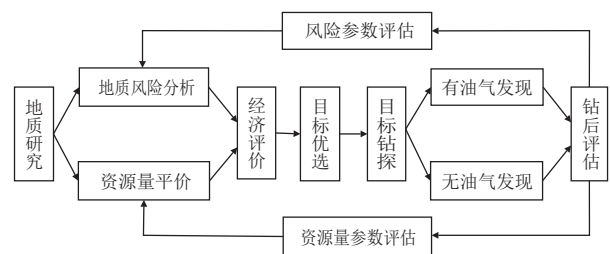


图 1 勘探目标评价流程

Fig.1 Flow chart of exploration prospect evaluation

收稿日期: 2022-02-23; 修订日期: 2022-10-09。

作者简介: 王义刚(1973—), 男, 博士, 副研究员, 从事石油地质与油气资源评价研究。E-mail: wyg252525@126.com。

基金项目: 中科院 A 类战略性先导科技专项“深层油气勘探定量评价软件平台”(XDAXX010405)资助。

钻后评估就是在勘探目标评价的基础上通过钻前预测与钻后结果对比分析,找出钻前预测中不足之处,对预测值进行不断校正、完善,使勘探目标的钻前含油气、资源量估算等更加接近实际。

近年来,我国油气安全形势日益严峻,油气勘探开发面临重大挑战。因此,高效勘探越来越受到油气勘探专家的重视^[2]。充分利用已完钻井的资料,对勘探目标预测结果进行检验,并且采取必要的方法措施去识别和改正预测中的谬误是形成成熟勘探评价工作的重要过程。众所周知,在油气资源勘探的前期工作中存在许多预测工作,而任何的预测中都不可避免地存在不确定性^[3-4]。这种不确定性的存在要求对勘探目标钻前预测进行认真细致核查,以期学到更多的勘探经验。

1 勘探目标钻后评估的主要方法

1.1 自然偏差法

分析偏差是勘探目标钻后评估常用的方法,通过标准化 Monte Carlo 方法,计算出在钻探项目中各个阶段预测的预计最终可采储量 (Estimated Ultimate Recovery, EUR) 结果的 P90 和 P10 值。这些结果应该在 80% 的置信区间,因此,如果 EUR 的轨迹超出 80% 的置信区间,这些值应该引起重视,并且在合理井数下,应该重新进行跟踪分析。CAPEN 用下面公式来量化偏差^[5-6]:

$$D = \left(\frac{1}{n} \right) \left[\sum \ln \frac{P_c}{P_a} \right] \quad (1)$$

式中: D 为分析偏差; n 为模型使用的数量; P_c 和 P_a 分别为预测的 P90、 n 和实际 P90、P10。

1.2 百分数直方图

另一种识别偏差的方法是由 OTIS 等^[7]在 1997 年开发的。他们设计这种方法用于在分布估计中诊断偏差。运用这种方法,将钻后估算的资源量百分数绘制在已经被等分的直方图上。通过设置分类显示区间(分位数区间,默认的为 P20\40\60\80),对钻后资源量估算结果进行分析,根据估算的资评对象的资源量各分位数的分布位置来估计预测结果是否合理。

1.3 P10/P90 比值校验

OTIS 等^[8]还提出利用 P10/P90 比值进行实施跟踪分析。该方法提出,对于一个既定的投资方案,固定所有勘探目标的 P01,调整 P10/P90 比值将得到一个常数值。换言之,投资方案中的每一个勘探目标保持其原始的 P01,但是分派和其他勘探

目标一样的 P10/P90 比值。通过查看其他不同的投资组合,结果显示,尽管百分数直方图与预期的不同,关于分布有效性的结论则保持一致。也就是说,如果任何既定投资方案被认为太乐观,通过 P10/P90 调整的投资方案也会同样乐观。

因此,在进行钻后评估时,通过分析资源量参数或资源量的 P10/P90,可以检验钻前预测结果的有效性,如果钻前预测过于乐观,在将来的工作中可以将其作为一个参考,适当调整 P10/P90,使预测结果更加客观。

2 地质风险钻后评估

由于油气成藏条件具有较大的不确定性,油气勘探的风险性是不可避免的。为了科学反映油气成藏的不确定性,研究人员采用多种方法对油气成藏条件进行表征,进而预测勘探目标的地质风险(即含油气概率)。其中应用较为广泛的是地质风险概率法,该方法以油源、储层、圈闭、保存及配套史等油气成藏的客观条件为主要评价因素,根据相应的评价标准进行综合评价^[9-13]。闫相宾等^[14]在此基础上将油气成藏条件归纳为储层条件、圈闭条件成、充注条件及保存条件 4 项。通过对这 4 项成藏条件的存在性和有效性进行评价,分析油气成藏的可能性,避免可能出现的双重地质风险。这 4 项成藏条件可以看成是相互独立的,因此根据概率论原理,勘探目标的含油气概率为:

$$P_g = P_l \times P_i \times P_r \times P_p \quad (2)$$

式中: P_g 为含油气概率(油气成藏地质风险), P_l 为圈闭概率, P_i 为充注概率, P_r 为储层概率, P_p 为保存概率。

地质风险钻后评估就是根据勘探目标钻后成功与否,对比分析钻前对勘探目标成藏条件的估计和预测是否合理,找出影响钻探失败的主要因素。

2.1 成功井概率分析

成功井概率分析主要是在不同风险区间内,看钻探表现是否和预计的成功率一致。其主要作用是用于分析圈闭钻探成功率。圈闭钻探成功率是指一组圈闭中钻探成功的圈闭所占钻探圈闭的总比例,是用来衡量一个地区圈闭总体钻探情况的评价参数。在某一区域首批探井完钻的基础上,根据钻探结果对获得油气发现的钻井各项参数进行分析,并与该井钻前预测结果进行比较,然后对比分析哪个含油气概率区间预测结果与实际钻探结果比较吻合,哪个含油气概率区间预测结果与实

际钻探结果偏差较大,并对偏差较大区间的成藏条件进行分析,找出主要影响因素。根据分析结果,对其他未钻探圈闭的含油气性进行重新评价,并根据评价结果对其他部署井做出调整。

图2为某油田公司钻后成功井概率分析图,图中所统计的数据是钻后各勘探目标预测概率分布范围内成功井和失败井的个数及其对应的比例,玫红色为成功井数,蓝色为失败井数,红色虚线为某一概率区间内成功井数除以总井数的比例。对比结果显示,在预测结果含油气概率较低的区间,实际钻探后其成功率也是比较低的;在预测结果含油气较高的区间,实际钻探结果成功率也相对较高,因此总体的预测效果是比较理想的。

2.2 失利井分析

勘探失利井的分析已经成为油气勘探的组成部分,据了解,因油气地质条件不明而导致的失利占据多数^[15]。失利井分析主要是对已钻探的干井进行分析,通过分析对比钻后干井钻前与钻后评价参数和评价依据的变化,为其他相关的部署井和评价单元提供信息,从而为其他部署井和评价单元的钻后调整提供依据^[16]。失利井分析需要分析失利原因,找出各项地质风险因子中的主要风险,并对其准确率大小进行评价。失利井分析统计的是所有失利井的每一项地质因子总个数和钻后实际地质因子概率与预测地质因子概率符合的个数,由此分析失利原因中的主要风险。

图3为中国石化某油田第一、二批10口失利预探井地质因子概率分析图,统计钻前预测的这10口井的地质风险因子概率,其中圈闭概率为50%(地质风险因子概率为50%,表明该项因子不确定性程度较高,下同)的有3个,充注概率为50%的有4个,储层概率为50%的有6个,保存概

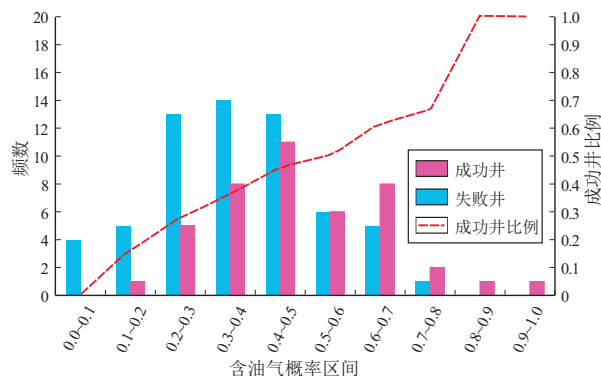


图2 某油田公司钻井实际钻探成功概率与预测结果对比

Fig.2 Comparison of actual drilling success probability and prediction results in an oilfield company

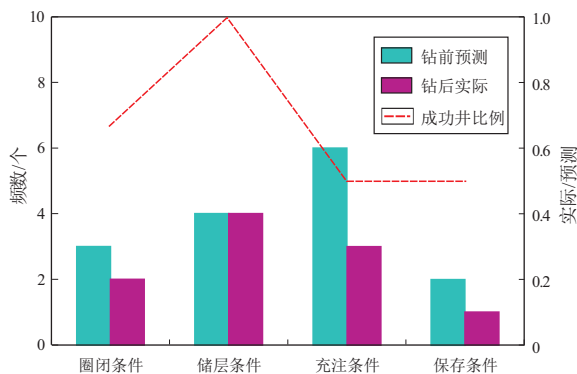


图3 某油田失利井地质风险因子钻前/钻后统计

Fig.3 Pre-drilling and post-drilling statistics of geological risk factors of failed wells in an oilfield

率为50%的有2个;实际钻探后,10口失利井中有2口井是圈闭条件不利,有4口井是储层条件不利,3口井是充注条件不利,1口井是保存条件较差。

分析结果表明,这10口井的储层条件钻前预测较为成功,而对于充注条件来说,钻前预测和钻后实际发现有较大的出入,因此,对于具有相似地质条件或处于相邻区域的勘探目标,在分析其成藏条件时应注意加强充注条件(包括油源、运移等)的研究。

3 资源量钻后评估

勘探目标资源量的对比分析,是在目标钻探后,根据取得的新资料调整资源量计算参数,进而估算钻探目标的资源量。通过对比分析不同阶段的资源量估算结果,查明资源量估算结果发生变化的原因(高估或低估),从而在以后的工作中,在相似的地质条件下进行勘探目标评价时借鉴这些经验。

勘探目标资源量的对比分析有以下两方面^[17]:(1)资源量结果对比,将钻后评价单元进行钻前预测结果和钻后估算资源规模对比;(2)资源量计算参数对比,将钻后重新估算资源量的参数和钻前预测资源量的参数放在同一图中进行对比分析。

资源量(或参数)对比分析图是以勘探目标钻前预测资源量(或参数)为横轴,钻后验证实际资源量(或参数)为纵轴,将资评对象投放到双对数坐标图中,根据资评对象在图中的位置分析对比资评对象的资源量(或参数)估算结果。

图4为渤海湾盆地某二级构造带上A,B,C,D,E,F等6个勘探目标的资源量计算参数及资源

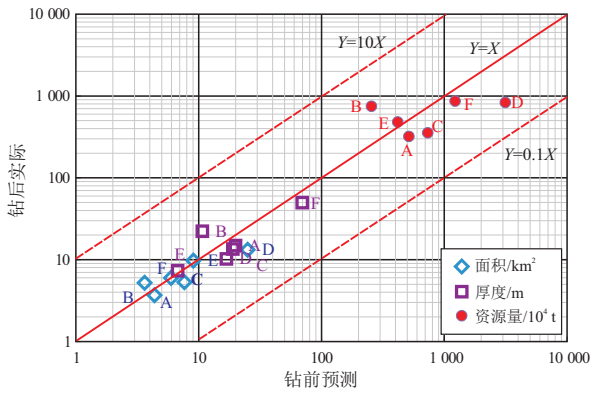


图4 渤海湾盆地某二级构造带上勘探目标的资源量计算参数及资源量钻前预测与钻后实际估算对比

Fig.4 Resource calculation parameters of exploration targets in a secondary structural belt of Bohai Bay Basin and comparison between pre-drilling prediction and post-drilling estimation

量钻前预测与钻后实际估算结果对比。

位于对角线 $Y=X$ 以上区域内的目标,钻前估算的资源量均小于钻后验证重新估算的资源量,说明钻前对该圈闭的资源量估计过于保守。该区域内,偏离对角线越远、越靠上的位置,实际值比钻前估算的值越大,钻前估算越保守。例如勘探目标 B 预测资源量为 255.2×10^4 t,钻后重新估算其资源量为 749.49×10^4 t,其主要原因在于储层厚度经钻探证实比预测的大(钻前预测储层厚度为 10.7 m,实际厚度约为 22 m),钻前估算较为保守。

位于对角线 $Y=X$ 以下区域内的勘探目标,钻前估算的资源量或计算参数均大于钻后验证重新估算结果,说明钻前对勘探目标的资源量和计算参数预测过于乐观;该区域内,偏离对角线越远、越靠下的位置,实际值比钻前估算的值越小,如目标 C、D。

位于对角线 $Y=X$ 附近的勘探目标,其钻前预测的结果和钻后验证结果符合较好,预测准确度较高,例如目标 A、E、F。

钻后评估用于检验目标评价人员的预测效果,而且钻后评估开展得越及时对勘探的帮助越大;钻后评估可以采用多种方法进行,对干井的分析有助于将每个勘探目标的失败状况汇编,比较分析其最小地质概率因子;另外,钻后评估带来的分析数据有助于在技术调整方面做出更多信息化的未来决策。

4 结论

(1) 勘探目标钻后评估是一项重要的检验工作,在于检验前期评价的准确性,分析前期评价中各参数的偏差,及时发现总结特定地区的勘探目标评价模式及经验教训,有助于其他勘探目标借鉴。

(2) 钻后评估反馈分析的关键点在于分析所评价的目标在钻探后是否获得油气发现,以及前期预测的结果与钻探后重新估算的结果是否吻合。勘探目标钻后评估可以用于分析地质风险评价和资源量评价过程中影响评价结果的关键因素,加强对主控因素的把控。

(3) 由于风险评估提供连续、系统的数据用于钻井决策,钻后评价能够带来有效的分析结果,有助于在技术调整、划时代事件及未来授权等方面做出更多信息化的未来决策。一个完整的勘探评价周期包括从计划实施风险分析、勘探目标评估到针对钻后审核估计衡量计算结果、分析结果模式以及从结果中学习带来必要的调整工作。

参考文献:

- [1] 李树森,王川,樊民星.对圈闭油气资源评价专家系统的认识[J].石油与天然气地质,1994,15(3):187-192.
LI Shusen, WANG Chuan, FAN Minxing. Our understanding of trap's oil and gas resources assessment expert system[J]. Oil & Gas Geology, 1994, 15(3): 187-192.
- [2] 胡素云,李建忠,王铜山,等.中国石油油气资源潜力分析与勘探选区思考[J].石油实验地质,2020,42(5):813-823.
HU Suyun, LI Jianzhong, WANG Tongshan, et al. CNPC oil and gas resource potential and exploration target selection[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(5): 813-823.
- [3] ROSE P R. 油气勘探项目的风险分析与管理[M]. 窦立荣, 万仑坤, 肖坤叶, 译. 北京:石油工业出版社,2002:6-50.
ROSE P R. Risk analysis and management of petroleum exploration venture[M]. DOU Lirong, WAN Lunkun, XIAO Kunye, trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002: 6-50.
- [4] 杨登维,周庆凡,郭宝申,等.油气资源地质风险分析与管理[M].北京:石油工业出版社,2009:21-158.
YANG Dengwei, ZHOU Qingfan, GUO Baoshen, et al. Geological risk analysis and management of petroleum resources[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009: 21-158.
- [5] CAPEN E C. The difficulty of assessing uncertainty (includes associated papers 6422 and 6423 and 6424 and 6425)[J]. Journal of Petroleum Technology, 1976, 28(8): 843-850.
- [6] CAPEN E. Dealing with exploration uncertainties[M]//STEINMETZ R. The Business of Petroleum Exploration. AAPG, 1992: 29-61.
- [7] OTIS R M, SCHNEIDERMAN N A. A process for evaluating exploration prospects[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(7): 1087-1109.
- [8] OTIS R, HARYOTT P. How low should you go: a method to calibrate estimates of P99 prospect reserves[M]//AAPG Convention. Houston, Texas, 2006.
- [9] 李沛然,秦若辙,石彦民.地质风险因素的条件概率分析[J].石油勘探与开发,1991,18(1):97-104.
LI Peiran, QIN Ruozhe, SHI Yanmin. An analysis of the conditional probability in the geological risk factors[J]. Petroleum Exploration and Development, 1991, 18(1): 97-104.

(下转第 1099 页)

Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans, Louisiana, USA; SPE, 2013.

- [7] 祝春生,程林松.低渗透油藏 CO₂驱提高原油采收率评价研究[J].钻采工艺,2007,30(6):55-57.

ZHU Chunsheng, CHENG Linsong. Research on CO₂ flooding in low permeability reservoir[J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30(6): 55-57.

- [8] 刘淑霞.特低渗透油藏 CO₂驱室内实验研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2011,33(2):133-136.

LIU Shuxia. Research on laboratory experiments of CO₂ drive in ultra-low permeability reservoir[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2011, 33(2): 133-136.

- [9] 赵明国,李金珠,王忠滨.特低渗透油藏 CO₂非混相驱油机理研究[J].科学技术与工程,2011,11(7):1438-1440.

ZHAO Mingguo, LI Jinzhu, WANG Zhongbin. The study on CO₂ immiscible mechanism in low permeability reservoir[J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(7): 1438-1440.

- [10] HOLM L W, JOSENDAL V A. Mechanisms of oil displacement by carbon dioxide[J]. Journal of Petroleum Technology, 1974, 26(12): 1427-1438.

- [11] HAWTHORNE S B, GORECKI C D, SORESENSEN J A, et al. Hydrocarbon mobilization mechanisms from upper, middle, and lower

Bakken reservoir rocks exposed to CO₂[C]//Proceedings of the SPE Unconventional Resources Conference Canada. Calgary, Alberta, Canada; SPE, 2013.

- [12] SONG Chengyao, YANG Daoyong. Experimental and numerical evaluation of CO₂ huff-n-puff processes in Bakken formation[J]. Fuel, 2017, 190: 145-162.

- [13] JIN Lu, HAWTHORNE S, SORESENSEN J, et al. Advancing CO₂ enhanced oil recovery and storage in unconventional oil play: experimental studies on Bakken shales [J]. Applied Energy, 2017, 208: 171-183.

- [14] JIN Lu, HAWTHORNE S, SORESENSEN J, et al. Extraction of oil from the Bakken shales with supercritical CO₂[C]//Proceedings of the SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference. Austin, Texas, USA; URTEC, 2017.

- [15] JIN Lu, SORESENSEN J A, HAWTHORNE S B. Improving oil transportability using CO₂ in the Bakken system: a laboratory investigation[C]//Proceedings of the SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control. Lafayette, Louisiana, USA; SPE, 2016.

- [16] LI Lei, ZHANG Yao, SHENG J J. Effect of the injection pressure on enhancing oil recovery in shale cores during the CO₂ Huff-n-Puff process when it is above and below the minimum miscibility pressure[J]. Energy & Fuels, 2017, 31(4): 3856-3867.

(编辑 徐文明)

(上接第 1091 页)

- [10] 蔡利学,邱全进.预探圈闭地质风险评价[J].大庆石油学院学报,2007,31(4):25-28.

CAI Lixue, QIU Quanjin. Geological risk analysis of traps in petroleum prospecting[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2007, 31(4): 25-28.

- [11] 唐大海,谭秀成,王小娟,等.四川盆地须家河组致密气藏成藏要素及有利区带评价[J].特种油气藏,2020,27(3):40-46.

TANG Dahai, TAN Xiucheng, WANG Xiaojuan, et al. Tight gas accumulation elements and favorable zone evaluation of Xujiahe Formation in Sichuan Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(3): 40-46.

- [12] ALEXANDER J A, LOHR J R. Risk analysis: lessons learned[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans; SPE, 1998.

- [13] 耿盼,吕艳萍,巫波,等.缝洞型油藏储量评价方法及开发对策[J].特种油气藏,2021,28(6):129-136.

GENG Tian, LYU Yanping, WU Bo, et al. Reservoir evaluation method and development counter measures for fracture-vuggy reservoir[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(6): 129-136.

- [14] 闫相宾,李军,杨双.三级圈闭含油气概率和资源量表征方

法探讨[J].石油实验地质,2014,36(4):495-499.

YAN Xiangbin, LI Jun, YANG Shuang. An approach to hydrocarbon-bearing probability and resource characterization of third-order trap[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(4): 495-499.

- [15] 金强,程付启,王秋彤,等.从油气成藏过程分析探井失利原因[J].石油实验地质,2019,41(5):621-629.

JIN Qiang, CHENG Fuqi, WANG Qiutong, et al. Reasons for the failure of petroleum exploration wells from the process of hydrocarbon accumulation [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(5): 621-629.

- [16] 郭元岭,蒋有录,赵乐强,等.济阳坳陷预探井失利地质原因分析[J].石油学报,2005,26(6):52-56.

GUO Yuanling, JIANG Youlu, ZHAO Leqiang, et al. Geologic reasons for unsuccessful preliminary prospected wells in Jiyang Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(6): 52-56.

- [17] 刘志强,陈继华,张文彪.跟踪分析方法及其在圈闭评价过程中的作用[J].石油实验地质,2014,36(4):511-515.

LIU Zhiqiang, CHEN Jihua, ZHANG Wenbiao. Performance tracking and its role in prospect evaluation [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(4): 511-515.

(编辑 黄娟)