

基于量化不确定性的储量升级动用潜力评价方法

肖玉茹, 黄学斌, 李 姝, 刘丽琼, 李 军

(中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要: 未升级、动用储量多数为低品位储量, 如何评价储量升级动用潜力是迫切需要解决的问题。低品位储量存在地质条件复杂、储层非均质性强、数据资料有限和阶段认识局限等不确定性, 常规评价方法效果不佳。为此, 建立了一套基于量化不确定性的储量升级动用潜力评价方法, 实现了 3 个方面的改进: 一是改变了以往国内储量采用确定性法估算的唯一值, 储量用范围值来描述不确定性, 并提出了用确定性程度来定量表征储量的风险; 二是建立了储量升级动用潜力评价指标体系、关键参数不确定性的评价方法及评价流程; 三是由以往重视储量规模向储量价值转变, 利用风险—价值评估技术, 建立了“确定性程度、单位储量/资源量价值和储量/资源量”的三因素潜力评价模型, 潜力区块划分为四类, 即 I 类低风险高价值、II 类低风险低价值、III 类高风险高价值和 IV 类高风险低价值, 从而实现储量—产量—价值评估三统一的潜力评价平台。通过应用实例表明, 利用上述方法可以有效地实现储量升级动用潜力评价和目标优选, 筛选出的升级动用潜力区块与后续的升级动用效果基本吻合, 验证了上述方法的可靠性与合理性。

关键词: 区块优选; 潜力评价指标体系; 储量价值评估; 定量方法; 储量计算

中图分类号: TE155

文献标识码: A

A method for evaluating the potential of reserve upgrading based on quantitative uncertainty

XIAO Yuru, HUANG Xuebin, LI Shu, LIU Liqiong, LI Jun

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

Abstract: Most of the initial in-place and undeveloped OOIP are low-grade reserves, and how to evaluate their potential is an urgent problem. There are many uncertainties in low-grade reserves, such as complex geological conditions, strong reservoir heterogeneity, limited data and limited geological knowledge. The reliability of the conventional evaluation method is poor. Therefore, a series of systematic evaluation methods for initial in-place and undeveloped OOIP on the basis of quantitative uncertainty was proposed, which mainly focused on three improvements. Firstly, the range value was used to describe the uncertainty of OOIP, which changed the unique value estimated by the certainty method in the past. The degree of certainty was proposed to quantitatively characterize the risk of reserves. Secondly, the evaluation index system, the evaluation method and the evaluation process of uncertainty of the key parameters were established. Thirdly, the new method was changed from the previous emphasis on reserve scale to reserve value, established a three-factor model of “the degree of certainty—unit reserves/resources value and the scale of reserves/resources” by applying risk-value assessment technology. Potential blocks were divided into four categories, namely type I with low risk and high value, type II with low risk and low value, type III with high risk and high value, and type IV with high risk and low value. In this way, a potential evaluation platform combining reserves, production and value evaluation was proposed. The application of the method showed that it can effectively evaluate the reserve upgrading and development potential and optimize the blocks, and the selected blocks are basically consistent with the subsequent upgrading and development of potential blocks, which verified the reliability and rationality of the method.

Key words: block optimization; potential evaluation index system; reserve value assessment; quantitative method; reserve calculation

随着国家对能源需求的加大和石油公司落实国家“大力提升油气勘探开发力度”的要求, 急需

盘活未升级动用的储量。目前我国未升级动用地质储量规模大, 油藏类型以特低渗、稠油油藏和特

殊岩性油藏等低品位储量为重,这些未升级动用储量已成为增储上产不可忽视的资源基础,如何评价储量的升级动用潜力是迫切需要解决的问题。

目前储量升级潜力评价采用确定性方法,潜力评价的储量均采用一个定值,对未升级动用储量区块的不确定性和风险考虑不足,缺乏明确的不确定性范围描述。我国也没有出台相关的储量升级动用潜力分类评价的规范^[1-5],不同油公司采用不同的储量潜力分类评价思路。如中国石油注重按照内部收益率进行分类评价;中国石化以往主要按储量落实程度进行分类,近年按照不同油价进行储量潜力分类评价,储量潜力评价方法主要采用类比法和统计法^[6-10]。类比法和统计法存在一定的局限性,主要是由于没有考虑不同类型油藏储量升级动用主控因素、升级条件、升级率变化规律以及改善开发效果潜力的差异性。类比法一般用升级率进行升级地质储量规模预测,比较适用于规划计划部署编制。以往储量升级动用潜力评价比较注重对储量的品质和储量规模的评价,缺乏从储量价值和不确定性角度来考虑储量的升级动用潜力;多数学者和专家采用多参数的蒙特卡洛法和灰色聚类等数学模型^[11-31]进行潜力区块优选排队,其实现难度大、可操作性差。本文采用范围值来描述储量的不确定性、评价风险,从储量价值和风险角度开展储量的升级动用潜力评价研究,建立了一套基于风险—价值的潜力评价指标体系,重点对关键参数的不确定性进行描述,创立了“确定性程度、单位储量/资源量价值和储量/资源量”三因素模型,将储量升级动用潜力区块划分为四类,比较科学、合理地描述储量升级动用潜力评价的不确定性和风险。

1 评价方法原理

从 3 个方面改进储量升级动用潜力评价方法:一是改变了以往国内储量采用确定性法估算的唯一值,应用 SPE-PRMS 储量标准,考虑用范围值来描述储量的不确定性,并提出了确定性程度定量指标来表征储量的风险,从而更好地表征由于油藏地质条件的复杂性、资料的有限性和阶段认识的局限性等带来的储量风险;二是为科学、合理地描述储量升级动用潜力评价的不确定性,构建了一套系统、完整的储量升级动用潜力评价流程、评价指标体系和关键参数确定方法;三是注重经济效益,突出储量价值,采用风险分析、储量价值评估方法和多情景分析等技术,形成了油气藏全生命周期的储量升级动用潜力评价方法,可以实现储量—产量—

价值评估三统一的潜力评价平台,不同盆地、不同地区及不同储量区块在统一的平台上进行排队优选,从而减少储量的不确定性,降低投资风险。

针对未升级动用的储量区块,首先分析不同类型油气藏已升级动用储量的变化规律,明确升级动用的主控因素;在此基础上,开展潜力评价指标体系计算,应用 SPE-PRMS 储量标准,进行未升级动用储量区块的储量分级分类,采用储量价值评估方法和多情景分析等技术,确定关键参数的计算方法和取值原则,定量计算潜力评价的关键参数。根据关键参数的计算结果,确定本次潜力评价的门槛值和目标值,建立“风险—价值”的升级动用潜力评价模型,开展储量升级动用潜力区块优选排队,最终提出储量升级动用的目标区块和储量升级动用的对策(图 1)。

2 关键评价参数及确定方法

潜力评价指标体系分为两级指标(表 1):一级指标包括储量/资源量、单位储量/资源量价值和确定性程度;二级指标包括原地量、技术可采量、剩余经济可采量、储量/资源量价值、原地量 P_{90} 和 P_{50} 。

潜力评价指标体系的评价方法、不确定性关键参数和不确定性的影响因素详见表 1。储量评估通常在勘探、开发各个阶段采用不同的方法,并常常是几种方法的有机整合,以便科学、合理地给出不确定性的范围值^[11-16]。

2.1 储量/资源量

储量评估的不确定性主要取决于地质条件的复杂性和油气藏的非均质性、开发技术水平及效

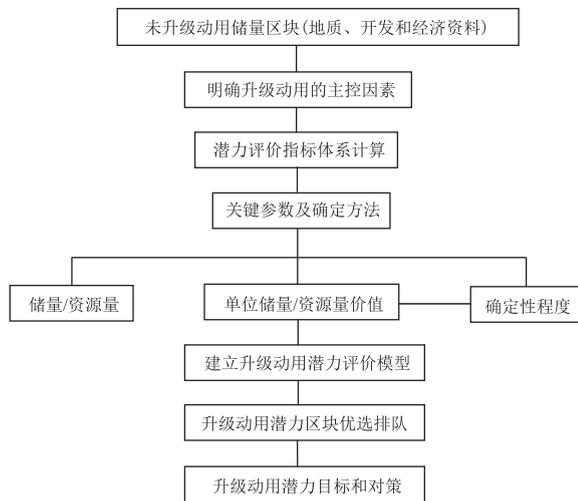


图 1 储量升级动用潜力评价原理

Fig.1 Evaluation mechanism of reserve upgrade potential

表 1 储量升级动用潜力评价指标体系的不确定性描述

Table 1 Uncertainty description of reserve upgrade and development potential evaluation index system

序号	一级指标	二级指标	评价方法	不确定性关键参数	不确定性影响因素
1	储量/资源量	原地量	概率法、确定性(增量)法和确定性(方案或情景)法	含油气面积、有效厚度、有效孔隙度、含油气饱和度、原油体积系数等	地震资料、时深转换、储层连续性、储层品质、已知烃底和推测的充注高度、流体性质、油气藏类型等
		技术可采量	理论公式、经验公式或类比法	采收率	驱动机理、水或气窜、地层伤害、注入压力、设备完整性、计量精度、垂直举升和改善开发效果等
2	单位储量/资源量价值	剩余经济可采量和储量/资源量价值	现金流法、类比法(对比销售法)、经验法(单位储量价值法、单位产量价值法和利润投资比率法)等	初产、递减率、投资、成本、油价	价格、成本、商业性、法律、政治、财税体制等
3	确定性程度	原地量 P_{90} 和 P_{50}	概率法、增量法和情景法	含油气面积、有效厚度等	地震资料、时深转换、储层连续性、储层品质、已知烃底和推测的充注高度、流体性质、油气藏类型等

果、数据资料的质量和数量、经营环境以及评估人员的技能和经验等。在勘探阶段,由于地质认识程度和资料所限,面临地震资料、时深转换、储层连续性、储层品质、已知烃底和推测的充注高度、流体性质、油气藏类型等的不确定性,应用概率法和确定性方法来有效表征原地量的“不确定性”。本文主要采用确定性法计算原地量,类比法计算技术可采量。

SPE-PRMS 确定性法包括增量法和方案法或情景法^[11-16],都是采用低估值(P_{90})、最佳估值(P_{50})与高估值(P_{10})表征不确定性。两者差别是当使用增量法进行容积法评估时,每个参数都采用唯一值计算原地量或储量($P1/C1$ 、 $P2/C2$ 、 $P3/C3$);方案法或情景法用 3 个确定方案即三套地质和工程数据的关键输入参数代表低估值($1P/1C$)、最佳评估($2P/2C$)和高估值($3P/3C$)。目前常用的方法是增量法(或井控法),井控法比较适用于储量评估,不适用于潜在资源量评估,潜在资源量评估应结合成藏的地质认识和井控原则,采用方案法或概率法确定。

对地质储量(原地量)结果影响最大的 2 个参数是含油(气)面积和有效厚度。由于勘探开发早期认识程度的不同,含油面积一般不会是一个定值,因此含油(气)面积的确定中,首先要确定油气藏边界,在确定了油气藏边界后,要考虑油气藏类型、井控程度、储层连续性和生产连续性要求,以及钻遇流体界面、边界类型等因素,根据各类资料,按照 SPE-PRMS 规则,综合判断边界的不确定性类型,进而划分 $1P/2P/3P$ 或 $1C/2C/3C$ 的面积。对于勘探新区,以地质认识为主确定,结合区域类

比;开发老区结合地质认识和井控原则确定。勘探开发早期资料偏少,推荐的方法是首先基于“合理的确定性”和“井控原则”结合“可靠技术”,确定 P_{90} 边界,然后结合地质认识进一步确定 P_{50} 和 P_{10} 的边界,归纳为以地质认识为基础,可靠技术与井控范围为约束的 SPE-PRMS 地质储量评估方法。

类比法无论是在地质储量估算,还是在可采储量评估中都有广泛应用,尤其是在采收率的选取过程中。国内一般采用理论公式法、经验公式法或类比法确定技术采收率,再与原地量相乘计算技术可采量。通常取一个定值或平均值,实际上可采量因受油气藏开发方式、油气藏类型、储层物性、流体性质和驱动类型等因素影响,即使某一开发技术得到广泛应用,针对具体油气藏,由于地质特征以及操作条件的千差万别,实际采收率也存在较大的不确定性,尤其是勘探开发早期其不确定性程度更大。采用类比法时,应选择具有一定规模、井网基本完善、开发方式合理、开发时间较长、规律性较好的开发单元类比,目标油气藏综合评价参数应与类比油气藏基本相近。类比评价参数包括但不限于计算的深度、压力、温度、油气藏驱动机理、原始流体饱和度和油气藏流体重力、油气藏大小、总厚度、产层厚度、净毛比、岩性、非均质性、孔隙度、渗透率和开发方案等。可类比油气藏需要有相同或非常相似的成因,如沉积、成岩、压力、温度、化学和机械作用以及构造形变。相同类型的油气藏,尽管采用相同的开采方式等,但由于地质及油藏条件等的差异,导致开发效果不同,最终采收率不同。对比几个相似油气藏、相同提高采收率方法的不同效果,可以

更好地确定目标油气藏可采量估算的不确定性范围。基于不同置信度的原地量规模,结合 P_{90} 、 P_{50} 和 P_{10} 的采收率,综合确定 P_{90} 、 P_{50} 和 P_{10} 的技术可采量。

2.2 储量/资源量价值

油气储量资产价值是衡量石油公司勘探、生产和经营状况的依据,有助于石油公司领导层决策。国外油气资产价值评价方法主要有三类七种,包括现金流法、类比法(对比销售法)、经验法(单位储量价值法、单位产量价值法和利润投资比率法)等。现金流法是国际石油公司通用的方法,也是最常用的主要方法,是其他方法的基础,本次研究主要采用现金流法。

SPE-PRMS 标准储量价值现金流法的不确定性主要体现在关键参数的选取上。由于受到地质认识、技术水平和经营环境等方面的影响,关键参数存在较大的不确定性,特别是开发指标(如初期产量和递减规律等)和经济评价等关键参数的合理选取至关重要。不同类型油气藏、采用不同的开发方式,在不同的开发阶段其开发规律和经济评价参数都可能存在差异,因此需要深化不同类型油气藏的开发规律研究,确定合理的单井产能和递减率等。根据试油(气)、试采及系统试井确定合理的生产压差,计算单井产能,也可采用产量折算法或类比法确定合理的单井产能。根据油气藏类型、开发方式和开发井型等,结合相似已开发油气藏递减规律研究,确定合理的稳产期年限和递减期、递减率等。不同级别的储量/资源量的投资取值没有原则性区别,未来开发投资和成本水平取值要结合项目特点,可按照当前投资和成本水平取值,也可参考当前水平考虑一定的技术降本与管理降本效果取值。为了减少参数估值的不确定性和编制三套开发概念/开发方案的复杂性,可以简化计算 2P/2C 的储量价值,再结合敏感性分析,估算 1P/1C 和 3P/3C 的储量价值,并评价其开发风险或潜力。

2.3 确定性程度

常规储量评估采用确定性方法均采用一个储量定值,当面对非均质性严重、存在较大不确定性的油气藏时,由于缺乏明确的不确定性范围描述,勘探开发风险大,不利于勘探开发部署决策。

通过不确定性评估,可以充分研究影响不确定性的因素,通过低估值、高估值与最佳估值的差异分析,可以揭示项目风险程度,有利于降低决策风险,提高投资效益。通常用 P_{10} 与 P_{90} 的比值来反映资源量参数或结果的不确定性^[17]。本文确定

性程度指标采用原地量 P_{90}/P_{50} 来表征。随着地质认识程度的加深和勘探开发程度的提高,不确定性不断降低,逐步接近最佳估值,确定性程度(P_{90}/P_{50})的比值逐渐接近 1。

3 评价流程

3.1 建立潜力评价模型

多数学者和专家采用多参数的蒙特卡洛、灰色聚类等数学模型和软件工具开展区块潜力评价和区块优选,但实现难度大、可操作性差。由于储量区块升级动用存在一定的不确定性和风险,因此本文考虑用量化指标来描述储量的不确定性,建立“确定性程度、单位储量/资源量价值和储量/资源量规模”三因素的四宫格模型,确定性程度大于 0.5 为低风险高确定性程度,小于 0.5 为高风险低确定性程度。根据单位储量/资源量价值的大小、储量/资源量规模和确定性程度,将储量区块划分为四类,储量升级动用的序列依次为 I 类 > II 类 > III 类 > IV 类(图 2)。

I 类属于积极推进的低风险、高价值、可快速升级动用储量优质区块;II 类属于稳步推进的低风险、低价值、可升级动用储量区块;III 类属于油价回升后实施的高风险、高价值的可升级动用储量区块;IV 类属于暂缓实施的高风险、低价值的暂不可升级动用储量区块。

3.2 评价流程

第一步,针对储量区块,采用 SPE-PRMS 标准开展储量及资源量分级分类。划分标准主要引用《SPE-PRMS 2018 修订版》和《PRMS 应用指南 2011 版》中相关标准规范条款。SPE 评价以项目

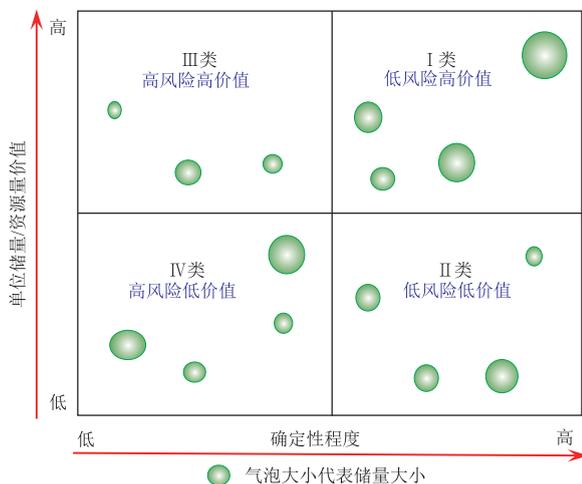


图 2 储量升级动用潜力评价模型示意

Fig.2 Model of reserve upgrade and development potential evaluation system

为基础,根据项目的商业性机会和资源数量估算的不确定性进行分级分类。纵向上,依据商业性机会进行分级,随商业性机会的不断增加,分为远景资源量(U级)、潜在资源量(C级)和储量(P级)。

第二步,关键参数计算。首先确定关键参数的计算方法和取值原则,采用容积法、类比法和现金流法等,分别计算以下 3 个关键参数。

(1) 储量/资源量(万吨) = 原地量(OOIP 或 OGIP); (2) 年度决策油价下的单位储量/资源量价值(万元/万吨) = 储量/资源量价值/剩余经济可采量; (3) 确定性程度 = 原地量(P_{90}/P_{50}), 值越大, 确定性程度越高。

第三步, 门槛值确定与目标淘汰。年度决策油价下的单位储量/资源量价值门槛值, 可以根据所有储量区块的具体情况确定或采用平均值, 储量价值大于 0 即为有效益, 否则淘汰。确定性程度门槛值为 0.5。

第四步, 潜力区块优选排队。将各储量区块计算的确定性程度、单位储量/资源量价值和储量/资源量规模投到评价图版上, 作散点图, 1 个点代表一个储量区块。根据散点所落的地区, 进行升级动用区块优选, I 类区块优于 II 类区块, II 类区块优于 III 类区块, III 类区块优于 IV 类。同类目标采用“潜力储量区块单位储量/资源量价值”大小排队。

4 实例应用和方法验证

4.1 关键参数及其确定方法

基于以上建立的储量升级动用潜力评价模型和评价流程, 对某公司某年度新增控制储量的 44 个区块, 采用 SPE-PRMS 标准开展储量升级动用潜力评价研究, 确定可升级动用的潜力区块, 为勘探开发部署提供依据。

(1) 开展计算 SPE-PRMS 标准下的储量分级分类。经过试油并投产, 但目前没有正式开发方案, 尚未投入商业开发的区块暂定为 C 级潜在资源量(37 个); 区块是已发现的油藏, 已经过试油并投产, 目前已有正式开发方案, 投入开发的区块定为 P 级储量(7 个)。

(2) 关键参数计算。原地量(1P/2P/3P 或 1C/2C/3C) 计算方法为容积法, 含油(气) 面积和有效厚度等取值原则采用以地质认识为基础、可靠技术与井控范围为约束的评估方法。依据开发概念设计/开发方案, 对原地量(2P/2C) 进行井网部署、勘探开发投资估算和开发指标预测。采用现金流法计算折现率 12% 和油价 70 美元/桶条件下

2P/2C 的经济可采量和单位储量/资源量价值。

(3) 计算区块的确定性程度, 即原地量 P_{90}/P_{50} 。

4.2 潜力评价结果和后续实施效果

4.2.1 储量区块(P级)

70 美元/桶为公司决策油价, G 区块的单位储量/资源量价值为 0 即剔除 G 区块, 剩余 6 个区块的评价结果: I 类 1 个和 II 类 5 个, 具有升级动用的潜力区块 6 个, 优先升级动用的区块为 D 区块(图 3)。D 区块是近年来新发现的油气藏, 9 口完钻井中 7 口获得高产工业油流, 已编制开发方案, 满足商业性条件, 按照 SPE-PRMS 标准定为 P 级储量。含油面积等取值原则为基于“合理的确定性”和“井控原则”结合“地震可靠技术”, 确定 P_{90} 边界, 然后结合油藏地质认识进一步确定 P_{50} 和 P_{10} 的边界; 采用容积法计算原地量(P_{50}) 为 4 478 万吨, 确定性程度 0.7。开发指标预测主要依据 D 区块的开发方案, 投资成本税费等参数取值原则参考本地区最新的投资成本等经济参数, 采用现金流法, 折现率 12% 和油价 70 美元/桶条件下计算储量价值 2 207 万元, 单位储量价值 762 万元/万吨。

通过对 6 个潜力区块近三年的储量升级动用情况跟踪分析, P 级储量区块全部实现升级动用, 升级动用储量规模为 1 833 万吨, 符合率 100%。其中 I 类 D 区块第一年实现储量升级动用建产, 三年实际动用地质储量 1 353 万吨, 优质规模储量是储量升级动用的基础, 并为提升储量价值做出了贡献。II 类的 C 区块单位储量价值 67 万元/万吨, 三年共动用地质储量 294 万吨。由于 C 区块为勘探新发现的断块油藏, 储量价值评估参数取值不太合理, 评估结果偏保守。第二年该区块单位储量价值高达 406 万元/万吨, 与近三年实际升级动用情况相符。C 区块属于小而肥的优质规模储量, 针对远离油源、储层薄、横向变化快、地震分辨率低等问题, 强化油气成藏规律研究、采用波形指示反演等

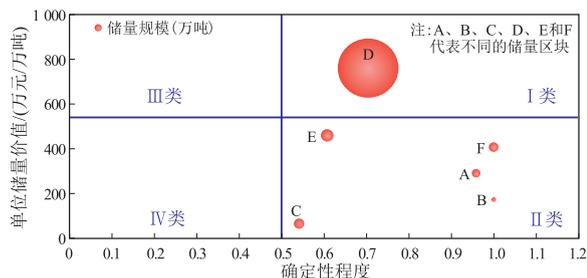


图 3 70 美元油价下 P 级储量区块潜力评价

Fig.3 Potential evaluation chart of reserve blocks for \$ 70 oil price

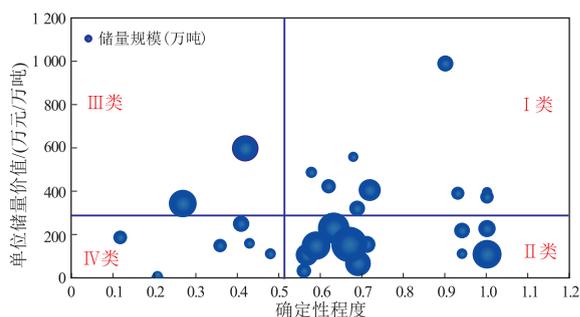


图 4 70 美元油价下 C 级储量区块潜力评价

Fig.4 Potential evaluation chart of contingent resource blocks for \$ 70 oil price

技术,实施勘探开发一体化运行,实现了高质量勘探开发,升级动用效果好,实现当年升级动用当年建产。

4.2.2 潜在资源量区块(C级)

70 美元/桶为公司决策油价,单位储量/资源量价值为 0 的 8 个区块剔除,剩余 29 个区块评价结果: I 类区块 10 个, II 类区块 11 个, III 类区块 2 个, IV 类区块 6 个(图 4)。

对 29 个潜力区块开展近三年的升级动用情况跟踪分析,其中 20 个区块近三年实现升级动用,符合率 69%,升级动用储量规模 2 391 万吨。其中 I 类潜力区块 10 个,实际升级动用 8 个; II 类潜力区块 11 个,实际升级动用 9 个; III 类潜力区块 2 个,实际全部升级动用; IV 类潜力区块 6 个,实际 5 个未实现升级动用,这也证实了该分类的科学性和有效性。对于 IV 类暂不可升级动用的储量区块,今后应补充评价部署工作量,进一步评价落实储量,同时开展技术攻关和降本增效等措施,不断降低区块的平衡油价,从而实现储量升级动用。

5 结论

(1) 基于量化不确定性的储量升级动用潜力评价和评价方法,采用“确定性程度、单位储量/资源量价值和储量/资源量规模”3 个潜力评价指标,实际效果验证表明筛选出的升级动用潜力区块与该区块后续的升级动用效果基本吻合,验证了该方法的可靠性与合理性。

(2) 储量升级动用潜力评价的合理性取决于关键参数选取的合理性和科学性,因此需要加强对储量价值结果的后跟踪对比分析,不断修正和完善地质、工程及经济等方面的参数,以提高对储量价值评估参数的科学、合理的选取能力。

(3) 以地质认识为基础、井控原则为约束,充分发展和应用可靠技术,是合理确定 SPE-PRMS

标准下原地量的三项重要原则。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.石油天然气资源/储量分类:GB/T 19492-2004[S].北京:中国标准出版社,2004:1-6.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Classifications for petroleum resources/reserves: GB/T 19492-2004[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004: 1-6.
- [2] 吕鸣岗,程永才,袁自学,等.石油天然气储量计算规范: DZ/T 0217-2005[S].北京:中国标准出版社,2005:7-33.
LV Minggang, CHENG Yongcai, YUAN Zixue, et al. Regulation of petroleum reserves estimation: DZ/T 0217-2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005: 7-33.
- [3] 杨通佑,范尚炯,陈元千,等.石油及天然气储量计算方法[M]. 2版.北京:石油工业出版社,1998:17-39.
YANG Tongyou, FAN Shangjiong, CHEN Yuanqian, et al. Estimation approach for oil and gas[M]. 2nd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998: 17-39.
- [4] 中石油天然气股份有限公司规划总院.中国石油天然气集团公司建设项目经济评价参数[R].北京:中国石油天然气集团有限公司,2017.
China Petroleum and Petrochemical Engineering Institute. Economic evaluation parameters of the investment project of PetroChina Company Limited[R]. Beijing: Petro China Company Limited, 2017.
- [5] 何鲜,石占中,周宗良.难动用储量油藏评价方法[M].北京:石油工业出版社,2005.
HE Xian, SHI Zhazhong, ZHOU Zongliang. Difficult-to-production reserves exploitation technologies[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005.
- [6] 刘国全,贾丽,刘娟霞,等.石油探明储量增长趋势预测方法及应用[J].中国石油勘探,2014,19(4):70-74.
LIU Guoquan, JIA Li, LIU Juanxia, et al. Prediction method of proven oil reserve growth trend and its application[J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(4): 70-74.
- [7] 庄丽,张玲.基于控制储量升级率的油气探明储量增长趋势研究[J].油气地质与采收率,2012,19(2):90-92.
ZHUANG Li, ZHANG Ling. Growth trend study of proved oil and gas reserves based on the upgrade rate of probable reserves[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(2): 90-92.
- [8] 朱杰,车长波,刘成林,等.储量增长预测模型的对比分析[J].西安石油大学学报(自然科学版),2008,23(5):21-23.
ZHU Jie, CHE Changbo, LIU Chenglin, et al. Contrastive analysis of reserves increasing prediction models[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2008, 23(5): 21-23.
- [9] 李国欣,郭绪杰,杜金虎,等.勘探对标管理指标体系模型研究及应用[J].中国石油勘探,2019,24(1):7-15.
LI Guoxin, GUO Xujie, DU Jinhu, et al. Research and application of the index system model of exploration benchmarking management[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(1): 7-15.

- [10] 刘瑞娟.统计法在渤南洼陷南斜坡沙三段资源潜力评价中的应用[J].特种油气藏,2019,26(6):41-45.
LIU Ruijuan. Application of statistical method in the resource potential evaluation of Sha-3 Member in the south slope of south Bohai Depression [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(6):41-45.
- [11] ETHERINGTON J R, RITTER J E. The 2007 SPE/WPC/AAPG/SPEE petroleum resources management system (PRMS) [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2008, 47(8):15-17.
- [12] ZAINUL A J, NOR R M, HONG T Y, et al. An integrated approach to petroleum resources definitions, classification and reporting [C]//SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. Kuala Lumpur, Malaysia; SPE, 1997.
- [13] PUREWAL S, ROSS J G, RODRIGUEZ J M, et al. Guidelines for application of the petroleum resources management system [R]. [S.l.]: Society of Petroleum Engineers, 2011.
- [14] SPE/AAPG/WPC/SPEE 2018-Petroleum resources management system (PRMS) [S]. 2018.
- [15] 胡允栋.基于不确定性分析的油气储量分类与评估方法[D].北京:中国地质大学(北京),2007:25-67.
HU Yundong. Oil and gas reserve classification and estimation on the basis of uncertainty analysis [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2007:25-67.
- [16] 李秀. SPE关于储量级别的划分与确定[J]. 中国石油勘探, 2010, 15(4):52-56.
LI Xiu. Classifications and establishment of SPE reserves [J]. China Petroleum Exploration, 2010, 15(4):52-56.
- [17] 黄学斌,李军,闫相宾,等.圈闭资源量参数概率分布及有效性检验[J].石油与天然气地质,2014,35(4):577-584.
HUANG Xuebin, LI Jun, YAN Xiangbin, et al. Probability distribution of parameters for trap resources assessment and its validation [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(4):577-584.
- [18] 邓聚龙.灰色系统:社会·经济[M].北京:国防工业出版社,1985.
DENG Julong. Gray system [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1985.
- [19] 刘永爱,董鸣皋.基于多属性决策的未动用油气储量评价方法研究[J].统计与信息论坛,2010,25(9):63-68.
LIU Yongai, DONG Minggao. Evaluation of undeveloped oil & gas reserves based on multi-attribute decision-making [J]. Statistics & Information Forum, 2010, 25(9):63-68.
- [20] 刘斌,任芳祥,易维容.探明未动用储量经济评价方法探讨[J].中国石油勘探,2003,8(4):67-70.
LIU Bin, REN Fangxiang, YI Weirong. Discussion on the methods of economic evaluation for undeveloped OOIP [J]. China Petroleum Exploration, 2003, 8(4):67-70.
- [21] 郭鸣黎,陈凌,汪桂敏,等. SEC准则下缝洞型碳酸盐岩油藏储量评估及应用实例探究[J].油气藏评价与开发,2020,10(2):11-17.
GUO Mingli, CHEN Ling, WANG Guiming, et al. Inquiry into evaluation methods and its application for reserves of carbonate fractured-vuggy reservoirs under SEC rules [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(2):11-17.
- [22] 朱桂良,孙建芳,刘中春.塔河油田缝洞型油藏气驱动用储量计算方法[J].石油与天然气地质,2019,40(2):436-442.
ZHU Guiliang, SUN Jianfang, LIU Zhongchun. An approach to calculate developed reserves in gas drive fractured-vuggy reservoirs in Tahe oilfield [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(2):436-442.
- [23] 赵启双.辽河油区难采储量综合评价[D].北京:中国地质大学,2002.
ZHAO Qishuang. Integrative evaluation of hard-to-recover reserves in Liaohe oil field [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2002.
- [24] 杨正明,张英芝,郝明强,等.低渗透油田储层综合评价方法[J].石油学报,2006,27(2):64-67.
YANG Zhengming, ZHANG Yingzhi, HAO Mingqiang, et al. Comprehensive evaluation of reservoir in low-permeability oilfields [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(2):64-67.
- [25] 杨子由,陈民锋,屈丹,等.特低渗透各向异性油藏井网加密储量动用规律[J].油气地质与采收率,2020,27(3):57-63.
YANG Ziyou, CHEN Minfeng, QU Dan, et al. Reserve producing law of extra-low permeability anisotropic reservoirs with infilled well pattern [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(3):57-63.
- [26] 尹万泉,武毅,于军.辽河油田 SEC 动态储量关键影响因素分析[J].特种油气藏,2019,26(2):87-90.
YIN Wanquan, WU Yi, YU Jun. Key influencing factor analysis of the SEC dynamic reserve in Liaohe oilfield [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(2):87-90.
- [27] 罗波,王兴明,赵敏,等.已探明未开发储量评价动用优选研究[J].西南石油大学学报(社会科学版),2013,15(2):5-9.
LUO Bo, WANG Xingming, ZHAO Min, et al. Research on optimizing proven undeveloped reserves [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Social Sciences Edition), 2013, 15(2):5-9.
- [28] 牛彦良,吴畏.未动用储量优选评价分析方法[J].石油学报,2006,27(S1):115-118.
NIU Yanliang, WU Wei. Optimized selection and evaluation method for nonproducing reserves [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(S1):115-118.
- [29] 覃利娟.概率法在油气储量不确定性分析中的应用[J].断块油气田,2019,26(6):723-727.
QIN Lijuan. Application of probability method to uncertainty analysis of oil and gas reserves [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2019, 26(6):723-727.
- [30] 冯国庆,张烈辉,沈勇伟,等.应用模糊聚类分析方法评价油藏质量[J].西南石油学院学报,2004,26(3):33-36.
FENG Guoqing, ZHANG Liehui, SHEN Yongwei, et al. Reservoir quality evaluation by fuzzy clustering analysis method [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2004, 26(3):33-36.
- [31] 易德生,郭萍.灰色理论与方法[M].北京:石油工业出版社,1989.
YI Desheng, GUO Ping. Grey theory and method [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989.