

引用: 王永祥. 非常规油气区带特征及资源管理思考 [J]. 中国 石油 勘探, 2022,27(3):20-26.

Wang Yongxiang. Characteristics of unconventional oil and gas plays and thoughts on resource management[J]. China Petroleum Exploration, 2022,27(3):20-26.

非常规油气区带特征及资源管理思考

王永祥

(中石油煤层气有限责任公司)

摘 要: 非常规与常规油气聚集体既有密切关联又存在本质区别。非常规油气区带具有 4 个基本特征, 包括用邻井推测未钻井区域生产特征的非可靠性、各井估算最终可采量 (EUR) 的统计分布具有可重复性、连续油气系统的区域性及游离烃的动力学特征具非达西性。因此, 非常规油气面临比常规油气更大的技术和商业挑战, 其资源储量应在 7 个方面创新管理理念, 包括储量资产价值化、经济可采储量为核心的分类体系、全生命周期一体化模式、缝控体积和井控储量、储层与生产特征的非均质性、风险定量评价和经济可采储量保守评估等。深化非常规油气区带特征研究与创新资源储量管理, 有利于推进中国非常规油气的勘探开发及油气资源管理体系的完善。

关键词: 非常规油气; 区带; 资源; 储量; 管理理念

中图分类号: TE121

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1672-7703.2022.03.002

Characteristics of unconventional oil and gas plays and thoughts on resource management

Wang Yongxiang

(PetroChina Coalbed Methane Company Limited)

Abstract: Unconventional oil and gas reservoirs are closely related but fundamentally different from conventional oil and gas reservoirs. There are four basic characteristics of unconventional oil and gas play, i.e., unreliability of predicting production performance by offset wells in area without well drilling, repeatability of the statistical distribution of the estimated ultimate recoveries (EURs) from wells, regionality of continuous petroleum system, and non-Darcy dynamics of free hydrocarbons. Therefore, the development of unconventional oil and gas faces greater technical and commercial challenges than that of conventional oil and gas, and the concept of resource and reserve management should be innovated in seven aspects, i.e., value management of reserve assets, classification system with economically recoverable reserves as the core, integrated model in the whole life cycle, fracture-controlled volume and well-controlled reserves, heterogeneity of reservoir physical property and production performance, quantitative risk evaluation, and conservative estimation of economically recoverable reserves. An in-depth study on the characteristics of unconventional oil and gas plays and innovative management of resource and reserve will support to promote the exploration and development of unconventional oil and gas resource and improve resource management system in China.

Key words: unconventional oil and gas, play, resource, reserve, management concept

0 引言

21 世纪以来, 非常规油气地质理论的发展推动了中国油气勘探开发从常规领域迈进非常规领域。在致密气、页岩气、煤层气, 以及致密油、页岩油

等非常规领域中已取得重要进展, 并已探明一大批非常规油气田, 油气产量也实现了较快增长。以中国石油为例, “十三五”期间, 非常规油气产量快速攀升、占比扩大, 非常规油气开发不仅伴随着“量”的增加, 更是实现了“质”的提升^[1]。据赵文智等研究预测^[2],

作者简介: 王永祥 (1962—), 男, 江苏常州人, 硕士, 1987 年毕业于石油勘探开发科学研究院研究生部, 教授级高级工程师, 长期从事油气储量评估研究和管理。地址: 北京市朝阳区太阳宫南街 23 号丰和大厦, 邮政编码: 100028。E-mail: yxwang@petrochina.com.cn

收稿日期: 2021-12-28; 修改日期: 2022-03-30

中国非常规气资源量大、探明率低,随着非常规天然气勘探开发理论、技术、管理/运行机制的不断创新,预计未来非常规气可供上产的探明地质储量将超过常规气;2035年前后,中国天然气的产量结构将逐渐转变为常规和非常规并重的发展格局。

非常规油气藏的特殊性决定了其面临比常规油气藏更大的技术和商业挑战,非常规油气资源在增储上产中地位日益凸显,探索与非常规油气藏特征相适应的资源储量管理新理念,建立非常规油气资源储量管理体系,助推效益勘探开发进程,对政府中长期规划、行业管理特别是相关油气田企业可持续发展十分必要和迫切。

1 主要术语与定义

油气资源(Petroleum Resources)是指自然存在于地表和地下的所有油气。包括所有类型的油气,既包括“常规”油气,也包括“非常规”油气;既包括狭义的资源(未发现的),也包括储量(已发现的);既包括可采的,也包括不可采的和已采出的(产量)^[3-5]。

非常规油气资源(Unconventional Petroleum Resources)是指在大范围内连续分布且不受流体动力明显影响,通常没有明显的构造或地层圈闭的储层中所蕴藏的油气资源^[3-5]。非常规油气包括煤层甲烷气(CBM)、致密气(含低渗透率盆地中心气)、致密油、天然气水合物、天然沥青(超高黏度油)和油页岩(干酪根)沉积物。其中致密气和致密油的子类型分别为页岩气和页岩油,其储集岩性主要为页岩或粉砂岩等细粒沉积岩^[3]。

非常规油气区带(Unconventional Oil and Gas Play)是指富集非常规油气资源的较大地质单元,包含非常规油气藏和非常规油气田^[5-6]。

非常规油气资源管理(Unconventional Petroleum Resources Management, UPRM)是石油资源管理中的非常规油气部分。石油资源评价(assessment)是估算已知的和待发现的烃类总量;石油资源评估(evaluation)通常侧重于估算具有商业价值的烃类数量;石油资源管理主要是估算潜在石油的数量、评估项目,并在完整的分类框架下报告结果的规则与方法^[5,7]。

2 非常规油气区带的基本特征

非常规油气藏与常规油气藏在油气来源与成因上存在着密切联系,两者在空间上紧密共生分布,形成

统一的常规—非常规油气“有序聚集”体系^[8]。邹才能等从储层特征、沉积环境、聚集机理等地质研究方面,以及勘探方法、“甜点区”评价、技术攻关、开发方式、开采模式等技术应用方面深入研究了非常规油气与常规油气的区别^[9],揭示了非常规油气藏的主要特征。

石油评估工程师协会(SPEE)提出判别非常规油气区带的一级标准和二级标准^[6]。本文从资源储量评估的角度,重点讨论非常规油气区带4个方面的基本特性。

2.1 用邻井推测未钻井区域生产特征的“非可靠特性”

在非常规油气藏中,即使地质环境相同(或非常相似),生产井的产量特征也存在很大差异^[10]。非常规油气井生产动态方面的差异除了受完井效率的影响外,还受非常规储层非均质性,包括厚度、岩性、孔隙度、渗透率、地应力、矿物学等方面差异的控制。

2.2 各井估算最终可采量(EUR)的统计分布具有“可重复特性”

估算最终可采量是指在给定日期,潜在可采油气估算量加上已采出量。单井EUR是非常规资源储量的评估核心。非常规油气区带井数多(常常超过100口),各井EUR差异很大。然而,北美各种非常规油气区带大量生产井的研究结果表明,不同年度、不同单井、不同井组甚至不同区块的EUR或峰值月产量差异很大,但经过对各单井数据标准化处理后,统计分布曲线基本不变。这一规律的发现,完全改变了常规油气藏可以有条件地开展单井(单样本)类比的传统做法,而将已开发井的EUR分布曲线作为类比模型,开展目标油气藏和待钻井区(未开发)EUR的预测。

2.3 连续油气系统的“区域特性”

非常规储层主要发育于低能贫氧—厌氧环境的细粒沉积体系中,如大型坳陷湖盆半深湖—深湖相,本身(除远源型外)或为烃源岩(源内),或与烃源岩紧密接触(近源),形成分布范围广的连续型油气系统。从储层发育的角度看,连续型非常规油气区带勘探风险性和资源不确定性均相对较低,含油气面积和原地量(地质储量)规模可以很大,估算的相对误差也可能较小。这种含油气系统的“区域特性”可能带来新增三级(如国内标准的探明、控制、预测)

地质储量的大幅度增长,显然新增三级可采储量很难同步增加。

2.4 游离烃的动力学特征具有“非达西特性”

非常规油气在储层中的赋存状态包括存储于孔隙空间中的游离烃和吸附于有机质上的吸附烃。煤层气和生物页岩气原地量主要为吸附气,致密油气和热解页岩油气原地量中游离烃占主体。常规储层游离烃通过浮力驱动作用聚集成藏。典型的非常规油气区带(源储一体、原位成藏、连续型油气系统)中的油气运移为初次运移或短距离二次运移,生烃增压和毛细管压力差是油气运移和聚集的主要动力,通常遵循非达西渗流定律^[9,11]。

非常规油气不因流体动力学作用而聚集成藏的机理导致储层下倾方向常常缺少明显的气水界面或油水界面。正是这种不以“烃—水界面”为界,而是具有以“散布边界(diffuse boundaries)”为特征的连续型储层(continuous reservoirs)^[12],使得俗称的非常规油气藏并非严格意义上的“藏”,而是某种非常规油气的“聚集体(accumulations)”。

除了上述4个方面的基本特性以外,非常规油气区带还具有许多其他特征^[13]。如储集物性差、渗透率低,非常规储层基质覆压空气渗透率通常小于0.1mD,以纳米、微米孔喉为主,孔隙微观结构复杂,以次生孔隙为主;无自然产能,开采要实现经济产量需要大规模的增产措施;改善完井技术常常能扩展气藏边界(人造藏);非常规油气藏中除煤层气藏和致密油藏外,很少产地层水;没有明显的圈闭;异常压力环境(高于或低于静水压力)很常见;地质储量可能很大,但采收率低于常规资源;单井的EUR通常低于常规油气藏等。

正是由于非常规油气区带具有上述特征,而与常规油气藏在储集对象、成藏机理、流体流动机理、生产动态、开发方式和开采技术等方面存在显著差异,必然带来资源储量管理上的差别与理念的转变。

3 非常规油气资源管理的新理念

3.1 储量资产价值管理理念

资源储量的规模历来受到广泛的重视,特别是地质储量大,常常更受关注。然而资源储量作为资源型企业核心资产,真正的价值体现在可采储量特别是经济可采储量上。非常规油气系统的地质条件决定了

其资源总体经济效益或储量价值比常规油气偏低,投资回报率不高。根据李国欣等测算,在现有技术水平和油价55~60美元/bbl情况下,中国陆相页岩油、致密油内部收益率在4.0%左右^[14]。非常规油气大都处于经济门槛附近,因此,生产经营管理理念必须以提升价值、提高投资回报率为核心。

从储量价值的角度,依据美国证券交易委员会(SEC)有关油气储量价值评估规则,测算中国石油天然气股份有限公司(简称股份公司)油气证实储量当量价值。依据2016—2020年平均价值计算,非常规天然气的价值整体偏低,如从事煤层气与致密气勘探开发的公司,其储量价值大致仅相当于股份公司国内储量平均价值的一半左右。因此,落脚到资源储量管理,着重建立储量资产价值理念十分必要。

3.2 经济可采储量为核心理念

中国20世纪主要借鉴了苏联以地质储量为核心理念的油气储量分类体系。2004年发布了国家标准《石油天然气资源/储量分类》(GB/T 19492—2004)^[15],2005年发布行业标准《石油天然气储量计算规范》(DZ/T 0217—2005)^[16],并进行了油气储量的套改。

尽管国家标准《石油天然气资源/储量分类》(GB/T 19492—2004)引入了经济可采储量类别,但由于该类别完全依附于对地质储量的分级,导致提交的部分探明储量,其地质储量虽然达到探明级的勘探开发程度和地质认识程度,但可采储量特别是经济可采储量常常没有达到“探明级”的程度。因此,非常规油气需强化经济可采储量的管理,改变地质储量为核心理念的分类体系,建立以经济可采储量为核心理念的管理体系。

3.3 全生命周期一体化评价理念

根据国家标准《石油天然气资源/储量分类》(GB/T 19492—2004)中勘探开发阶段划分与原地量(原地资源量或地质储量)间的关系和储量管理特点,总结了我国常规油气勘探开发阶段及资源储量管理流程。

常规油气通常可分为5个勘探开发生产阶段,分别对应5类项目,依据是否发现分为资源量和储量两大类,共5级(推测、潜在、预测、控制、探明),各级别的升级过程源自投资决策的落实(图1)。如对潜在(圈闭)资源量完成勘探(预探)设计部署决策,经预探井获得发现,在完成(预探)评价方案的部署决策后,由潜在(圈闭)资源量升级到

预测储量；经过进一步预探评价，完成初步开发方案后可申报控制储量；经过油气藏评价，完成开发方案后可升级为探明储量；在油气生产阶段依靠开发措施和调整，以及实施提高采收率项目，完成储量可采标定和复算、核算，实现储量动态管理^[17]。显然，常规油气的勘探开发遵循“节奏可以加快，

程序不能逾越”的原则，是一种循序渐进或称为“接力式”的流程。

非常规油气勘探开发程序突破了上述的流程, 强调全生命周期一体化评价。Baker Hughes 强调先导试验项目的重要性, 提出了先导试验项目 6 阶段的模式(图 2)^[10]。

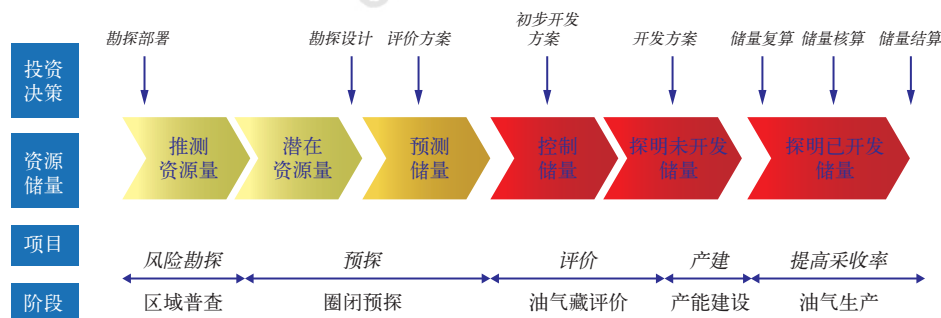


图1 中国常规油气资源储量分类和决策过程与勘探开发阶段

Fig.1 Classification of conventional oil and gas reserve, and decision-making process and exploration and development phases

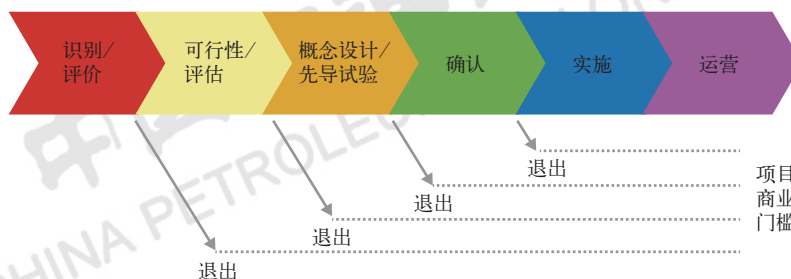


图 2 非常规先导试验项目阶段要素示意图 (据文献[10])

Fig.2 Evaluation process of exit mechanism of an unconventional pilot project (according to reference [10])

其中，(1) 识别 / 评价阶段，是对早期钻探的常规井分析或钻探专层直井 (dedicated vertical exploration wells)，证明存在致密和非常规的资源；(2) 可行性 / 评估阶段，是对直井和评价井压裂，选择侧向或水平段分段压裂，进行有限的生产测试，证明规模和产量；(3) 概念设计 / 先导试验阶段，是钻多口侧向井和多级压裂，确定初始产量和产量递减曲线的范围，建立区带商业生产能力，制定油气田开发计划 (FDP)；(4) 确认阶段，是完成详细设计和最终投资决策 (FID)；(5) 实施阶段；(6) 运营阶段。在上述前 4 个阶段的决策点达不到项目商业门槛标准即项目终止。

较大型的非常规油气区带可能不止一个先导试验区(项目)。当先导试验项目取得商业成功并符合地下特征时,该试验区将作为扩大开发的基础。通过多

个先导试验区及其进一步的扩展，逐步实现非常规油气区带（或整个油气田）的开发。

许多专家指出了对复杂油气藏,如非常规油气藏,实施地质工程一体化的重大意义^[18-20]。赵文智等在研究页岩气商业开发成功经验中指出^[21],在地质工程一体化平台下对地下资源进行全生命周期的仿真模拟,通过使用三维地质建模、地质力学模拟和复杂缝网模拟打造“透明”页岩气藏,通过井位部署设计、钻井工艺设计、压裂工艺设计实现三维空间优化部署和设计,通过井眼轨迹精确控制、压裂实时调整、生产动态管理获得最大的单井 EUR。李国欣等提出^[14],非常规油气资源应采用全生命周期管理模式,包括初期勘探、精细评价、试验优选、方案确定、计划实施和执行评估调整等阶段。

本文认为,非常规油气项目是上中下游一体化、

勘探开发一体化和地质—工程一体化的集成项目。勘探开发程序上需要将常规油气的5个阶段整合,由传统的循序渐进的流程向全生命周期一体化评价模式转变。资源储量的分类分级不再立足于对油气藏整体的勘探开发程度和地质认识程度,而要立足于对各类“甜点”的认识程度和项目全生命周期的经济可行性。在特定项目的早期阶段,资源储量的级别应随着反映技术和成本的特定的“学习曲线(learning curve)”的改善优化而升级。

3.4 井控缝控储量理念

常规油气藏存在于压力平衡的多孔渗透性储层中,油气原地量被圈闭在与局部构造和(或)岩性、地层条件有关的独立油气藏中(可相应形成复式油气聚集区带),在下倾方向通常以含水层为边界,油气层的原始位置或后期变化均由油气在水中的浮力与毛细管力之间的流体动力相互作用所控制。因此,常规油气藏的评价及其中原油与溶解气或气层气与凝析油等的储量评估均强调油气藏的整体性。由于非常规油气属于连续或准连续型油气聚集,油气具有大面积连续分布、圈闭界限不明显、无自然商业稳定产量、达西渗流不明显、储层以纳米—微米孔喉为主、低孔低渗总体致密等特征,非常规油气区带以评价优选“甜点”为勘探开发的核心,包括“地质甜点、工程甜点、经济甜点”^[9]。开发方式主要依靠水平井体积压裂技术,强调平台式多井“工厂化”开采。

非常规油气藏储量评估核心是确定缝控体积和井控储量。压裂改造体积(SRV),特别是对产能有直接贡献的支撑剂有效支撑体积(EPV)的预测与评估方法^[22],对非常规储量“容积法”评估具有十分关键的作用。很显然缝控达不到的空间,再多、再优质的原地资源量也只能是低级别的地质储量或资源量;缝控质量就像工厂的流水线,若流水线质量和效率不高,就谈不上产品的质量和产量。因此,评估对象上要实现由油气藏整体评估向压裂缝控体积和井控储量的转变。

3.5 非均质性理念

非常规油气区带大多具有大面积分布的特征,相对于常规油气藏,宏观(大尺度)上储层连续分布,易于对比追踪,容易造成平面上非均质性较弱的假象。非常规油气储层具有总体致密、物性较差的基本特征,成因上主要是“源储共生”型,部分属“近

源”型,细粒沉积物的小尺度结构与物质分异特征往往更复杂、更敏感。从微观(小尺度)上,非常规储层以纳米、微米孔喉为主,在沉积作用、储层成岩作用,以及后期改造的综合影响下,更容易造成层内、层间的非均质性。这也是造成非常规油气区带上“用邻井推测未钻井区域的生产特征不具有可靠性”的主要原因。因此,与常规油气藏可采储量评估不确定性主要源于含油气面积和有效厚度造成地质储量的风险不同,非常规可采储量评估的风险主要在于储层性质的变化(非均质性)。

3.6 风险定量评价理念

正是由于非常规油气藏地质条件的特殊性和大型压裂与地面集成系统等工程投资的浩大,加之对商业性条件变化的敏感性,非常规项目的决策更需要开展风险定量评价,其中资源储量的风险定量评估首当其冲,也就是非常规资源储量实现由确定性评估法向概率法的转变。

对常规油气储量的评估国内外均广泛采用容积法和动态法等确定性方法^[23]。石油工程师学会(SPE)等国际行业组织2011年发布的“石油资源管理体系应用指南”(PRMS应用指南)中指出,由于非常规油气藏通常分布在非常大面积的区域并以高密度钻井方式开采,所以该领域使用概率法比常规领域更适用^[4]。中国非常规油气主要分布于陆相地层,相比海相地层有利相带窄、相变快、非均质性更强,加强非常规可采储量风险管控尤为重要。

北美非常规油气开发的大量统计结果表明,尽管油气井的生产动态几乎各不相同,但存在明显的统计规律。其中“单井估算最终可采量(EUR)的统计分布具有可重复性”便是非常规油气区带最重要的特征之一,这种本质特性表明了概率法的适用性^[24-25]。通过非常规油气区带井数据的统计工具,如分布类型、图形技术、样本量、 P_{10}/P_{90} 比值及油气井EUR的集合分析等,建立类比井的统计分布模型,如EUR或峰值月产量的概率曲线,运用蒙特卡罗技术模拟目标井EUR的概率统计分布。

3.7 保守性评估理念

油气资源是自然界中的客观存在,但对其认识充满不确定性。不同勘探开发阶段,以及评估方法、地球科学和工程数据分析、现行经济条件、操作方法、政府规定等因素均影响资源储量的评估结果。长期以

来,中国油气储量界过度乐观的评估案例比比皆是,带来的危害巨大却又常常被人淡忘。非常规项目通常投资大、收益率较低、回收期较长,从油公司核心资产“保值增值”的角度,更需要保守评估,确保经济有效和资产增值。

非常规油气储量评估结果研判上应该实现由“算准地质储量”向“求稳可采储量”的转变。准确或客观计算原地资源量在任何情况下都是追求的目标,但这一目标常常无法有效实现。对非常规油气而言,开发方案的基础更多在经济可采储量上(包括不同的级别)。“求稳可采储量”特别是求稳经济可采储量是指随着新资料增加,高级别储量将实现正修正^[26],主要标志是开发投产后产能到位率为100%或更高,能够确保低效储量有效(甚至高效)开发。因此,储量评估结果(包括业绩考核等管理举措)研判上需要更多考虑不确定性,采取相对保守、稳妥和逐步趋“准”的原则。

4 结论

(1) 含油气盆地中常规与非常规油气有序聚集,后者常常源储一体、原位聚集、连续分布,自身的地质特征与常规油气存在本质区别。非常规油气区带的“四特性”决定了非常规油气储量评估应遵循的基本规则。例如用邻井推测未钻井区域生产特征的“非可靠性”,这一特性决定了储量评估类比法的应用条件、含油气面积圈定的方法和范围;单井估算最终可采量(EUR)的统计分布具有“可重复性”,这一特性揭示了非常规油气可采储量评估可能采取的新方法;连续油气系统的“区域性”,这一特性决定了非常规油气地质储量的规模化和可靠性;游离烃的动力学特征具“非达西性”,这一特性决定了储量评估中很重要的油气/水界面的确定规则、方法,以及依据渗流力学建立的采收率预测模型、计算公式等不再适合非常规油气藏。

(2) 建议完善非常规油气资源管理,考虑建立“7种新理念”。①在夯实资源数量规模的基础上,突出储量资产价值化管理;②在发扬中国地质储量和技术可采储量传统优势的同时,建立以经济可采储量为核心的分类体系;③在遵循勘探开发基本程序时,创新全生命周期一体化管理模式;④坚持整体评价,突出缝控体积和井控储量;⑤明确生产动态差异,刻画储层非均质性;⑥坚持资源储量多方法综合评估,推进概率法的应用;⑦储量评估留有余地,坚持保守评估、

逐步趋准原则。

(3) 创新非常规油气资源储量管理理念,有助于从根本上实现“两大转变”,即从“重地质储量向重经济可采储量转变”、从“重储量数量规模向重储量资产价值转变”,并以此为契机,推动常规油气储量的价值管理,促进中国油气资源储量管理整体迈上新台阶。

(4) 目前,SPE等7家国际行业组织提出的石油资源管理体系(Petroleum Resources Management System, PRMS)在国际上各层面均已得到广泛应用,其中非常规资源的管理已成为热点。UPRM所涉及的范畴均属于PRMS的重要组成部分,随着中国非常规油气领域勘探开发不断深化,中国的非常规油气资源管理必将能结出更丰硕的成果并在PRMS中体现更多中国贡献。

参考文献

- [1] 李国欣,雷征东,董伟宏,等.中国石油非常规油气开发进展、挑战与展望[J].中国石油勘探,2022,27(1):1-11.
Li Guoxin, Lei Zhengdong, Dong Weihong, et al. Progress, challenges and prospects of unconventional oil and gas development of CNPC[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(1):1-11.
- [2] 赵文智,贾爱林,王坤,等.中国天然气“十三五”勘探开发理论技术进展与前景展望[J].石油科技论坛,2021,40(3):11-23.
Zhao Wenzhi, Jia Ailin, Wang Kun, et al. Theoretical and technological progress and development prospect of China's natural gas exploration and development in the 13th Five-Year Plan period[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2021,40(3):11-23.
- [3] SPE, WPC, AAPG, et al. Petroleum Resources Management System[R]. Washington D.C.: IEA,2007.
- [4] SPE, WPC, AAPG, et al. Petroleum Resources Management System - 2018 Update[S]. SPE, 2018:15-16.
- [5] 王永祥,张君峰,谢锦龙,等.《石油资源管理体系应用指南》导读[M].北京:石油工业出版社,2017,146-182.
Wang Yongxiang, Zhang Junfeng, Xie Jinlong, et al. Conduct on guidelines for application of the petroleum resources management system[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2017,146-182.
- [6] 王永祥,李建忠,译.非常规油气区带未开发储量评估指南[M].北京:石油工业出版社,2012.
Wang Yongxiang, Li Jianzhong, translated. Guidelines for the practical evaluation of undeveloped reserves in resource plays[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [7] 刘保和.中国石油勘探开发百科全书(综合卷)[M].北京:石油工业出版社,2008,76-80.
Liu Baohe. Encyclopedia of petroleum exploration and development in China (comprehensive volume)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008,76-80.
- [8] 邹才能,杨智,张国生,等.常规—非常规油气“有序聚集”理论认识及实践意义[J].石油勘探与开发,2014,41(1):14-27.

- Zou Caineng, Yang Zhi, Zhang Guosheng, *et al.* Conventional and unconventional petroleum “orderly accumulation”: concept and practical significance[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014,41(1):14–27.
- [9] 邹才能, 陶士振, 白斌, 等. 论非常规油气与常规油气的区别和联系[J]. *中国石油勘探*, 2015,20(1):1–16.
- Zou Caineng, Tao Shizhen, Bai Bin, *et al.* Differences and relations between unconventional and conventional oil and gas[J]. *China Petroleum Exploration*, 2015,20(1):1–16.
- [10] Baker Hughes. Unconventional oil and gas resources: exploitation and development[M]. Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [11] 焦方正. 非常规油气之“非常规”再认识[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(5):803–810.
- Jiao Fangzheng. Re-recognition of “unconventional” in unconventional oil and gas[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019,46(5):803–810.
- [12] Mike Zak, 戴少武, 郭齐军. Oil and gas reserve guidelines[M]. 北京: 中国石化出版社, 2014,26–31.
- Mike Zak, Dai Shaowu, Guo Qijun. Oil and gas reserve guidelines[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2014,26–31.
- [13] 石油评估工程师协会. 低渗透油气藏已开发井最终可采量评估[M]. 李国欣, 毕海滨, 段晓文, 等编译. 北京: 石油工业出版社, 2021,7–24.
- Society of Petroleum Evaluation Engineers (SPEE). Estimating ultimate recovery of developed wells in low-permeability reservoirs[M]. Li Guoxin, Bi Haibin, Duan Xiaowen, *et al.*, translate. Beijing: Petroleum Industry Press, 2021,7–24.
- [14] 李国欣, 朱如凯. 中国石油非常规油气发展现状、挑战与关注问题[J]. *中国石油勘探*, 2020,25(2):1–13.
- Li Guoxin, Zhu Rukai. Progress and challenges and key issues of unconventional oil and gas development of CNPC[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020,25(2):1–13.
- [15] 全国国土资源标准化技术委员会. 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.
- National Technical Committee on Land and Resources of Standardization Administration of China. Classification for petroleum resources/reserves: GB/T 19492—2004[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.
- [16] 中华人民共和国国土资源部. 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.
- The Ministry of Land and Resources, PRC. Regulation of petroleum reserves estimation: DZ/T 0217—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005.
- [17] 王永祥, 张君峰, 段晓文. 中国油气资源 / 储量分类与管理体系[J]. *石油学报*, 2011,32(4):645–651.
- Wang Yongxiang, Zhang Junfeng, Duan Xiaowen. A classification and management system of petroleum resources/reserves in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011,32(4):645–651.
- [18] 张辉, 杨海军, 尹国庆, 等. 地质工程一体化关键技术在克拉苏构造带高效开发中的应用实践[J]. *中国石油勘探*, 2020,25(2):120–132.
- Zhang Hui, Yang Haijun, Yin Guoqing, *et al.* Application practice of key technologies of geology-engineering integration for efficient development in the Kelasu structural belt, Tarim Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020,25(2):120–132.
- [19] 包汉勇, 梁榜, 郑爱维, 等. 地质工程一体化在涪陵页岩气示范区立体勘探开发中的应用[J]. *中国石油勘探*, 2022,27(1):88–98.
- Bao Hanyong, Liang Bang, Zheng Aiwei, *et al.* Application of geology and engineering integration in stereoscopic exploration and development of Fuling shale gas demonstration area[J]. *China Petroleum Exploration*, 2022,27(1):88–98.
- [20] 谢军, 张浩森, 余朝毅, 等. 地质工程一体化在长宁国家级页岩气示范区中的实践[J]. *中国石油勘探*, 2017,22(1):21–28.
- Xie Jun, Zhang Haomiao, She Chaoyi, *et al.* Practice of geology-engineering integration in Changning State Shale Gas Demonstration Area[J]. *China Petroleum Exploration*, 2017, 22(1):21–28.
- [21] 赵文智, 贾爱林, 位云生, 等. 中国页岩气勘探开发进展及发展展望[J]. *中国石油勘探*, 2020,25(1):31–44.
- Zhao Wenzhi, Jia Ailin, Wei Yunsheng, *et al.* Progress in shale gas exploration in China and prospects for future development[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020,25(1): 31–44.
- [22] 方文超, 刘传喜, 苟斐斐, 等. 非常规油气藏水平井体积压裂改造体积计算方法[J]. *科学技术与工程*, 2021,21(5):1681–1689.
- Fang Wenchao, Liu Chuanxi, Gou Feifei, *et al.* Calculation methods of reservoir stimulated by volume fracturing of horizontal well in unconventional reservoirs[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021,21(5):1681–1689.
- [23] 王永祥, 段晓文, 徐小林, 等. SEC 准则油气证实储量判别标准与评估方法[J]. *石油学报*, 2016,37(9):1137–1144.
- Wang Yongxiang, Duan Xiaowen, Xu Xiaolin, *et al.* Determination criterion and the estimation methods for the proved reserves under the SEC regulation[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016,37(9):1137–1144.
- [24] 陈劲松, 韩洪宝, 年静波, 等. 概率法在页岩气未开发最终可采量评估中的应用: 以北美某成熟页岩气区块为例[J]. *天然气工业*, 2018, 38(7):52–58.
- Chen Jinsong, Han Hongbao, Nian Jingbo, *et al.* Application of the probability method to undeveloped EUR assessment of shale gas: a case study on one mature shale gas block in North America[J]. *Natural Gas Industry*, 2018,38(7):52–58.
- [25] 魏绍蕾, 黄学斌, 李军, 等. 基于概率法的页岩气单井最终可采量评估: 以焦石坝页岩气田加密井为例[J]. *石油实验地质*, 2021,43(1): 161–168.
- Wei Shaolei, Huang Xuebin, Li Jun, *et al.* Shale gas EUR estimation based on a probability method: a case study of infill wells in Jiaoshiba shale gas field[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2021,43(1):161–168.
- [26] 石油学会 (加拿大) 1 号专论. 油气储量评估方法[M]. 王永祥, 张君峰, 毕海滨, 等译. 北京: 石油工业出版社, 2012,8–12.
- Petroleum Society Monograph No. 1. Determination of oil and gas reserves[M]. Wang Yongxiang, Zhang Junfeng, Bi Haibin, *et al.*, translate. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012,8–12.