

常-非一体油气资源分布规律与勘探策略

胡宗全^{1,2}, 宋振响^{1,3,4}, 周卓明^{1,3,4}, 马中良^{1,3,4}, 杨国桥^{1,3,4}, 何川^{1,3,4}

(1. 页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室, 北京 102206; 2. 中国石化石油勘探开发研究院 北京 102206; 3. 中国石化石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126; 4. 中国石化油气成藏重点实验室, 江苏 无锡 214126)

摘要: 油气资源评价是精准掌握资源家底、科学规划勘探部署和保障国家能源安全的重要战略基础。进入“十四五”以来, 中国油气勘探逐步从以常规油气为主转向常规与非常规油气并重的新阶段。基于“常-非一体”油气资源评价在理论认识、技术方法和资源评价应用方面的进展, 深入剖析了评价区内常规与非常规油气的资源结构与分布规律, 明确了重点盆地的有利勘探方向, 主要取得以下认识: ①突破传统评价方法局限, 创新研发了基于盆地模拟的常-非一体油气资源评价新技术, 指出不同类型烃源岩的差异生-滞-排演化模式是实现常-非一体油气资源评价的关键。新方法揭示了全序列油气的有机成因联系和协同演化过程, 为常-非一体油气资源评价和勘探决策提供了重要依据。②评价区内常规油气原地资源量保持稳定, 非常规油气原地资源量则大幅增长, 总体呈现出“油气均衡、常稳非增”的资源结构特征, 重点大型盆地依然是油气勘探突破的主战场。③从资源发现率和分布特征来看, 常规与非常规油气的有序接替为实施“稳油增气”战略奠定了坚实的资源基础。常-非一体重点勘探方向主要集中在渤海湾盆地的古近系, 四川盆地的寒武系、二叠系和侏罗系, 以及鄂尔多斯盆地石炭系-二叠系与三叠系。

关键词: 生-滞-排机理; “十四五”; 勘探方向; 常-非一体; 油气资源评价

中图分类号: TE132.1

文献标识码: A

Distribution patterns and integrated exploration strategy for conventional and unconventional hydrocarbon resources

HU Zongquan^{1,2}, SONG Zhenxiang^{1,3,4}, ZHOU Zhuoming^{1,3,4}, MA Zhongliang^{1,3,4}, YANG Guoqiao^{1,3,4}, HE Chuan^{1,3,4}

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Efficient Development, Beijing 102206, China; 2. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China; 3. Wuxi Institute of Petroleum Geology, Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China; 4. Key Laboratory of Hydrocarbon Accumulation, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China)

Abstract: Evaluation of hydrocarbon resources provides a crucial strategic foundation for accurately quantifying resource potential, scientifically planning exploration activities, and safeguarding the national energy security. Since the implementation of China's 14th Five-Year Plan, the hydrocarbon exploration in China has gradually shifted from focusing solely on conventional resources to placing equal emphasis on both conventional and unconventional resources. Based on advances in the theoretical understanding, techniques and methods, and practical applications of the integrated evaluation of conventional and unconventional hydrocarbon resources, we examine the configuration relationships and distribution patterns of these resources within the evaluation areas and map favorable exploration targets in major petroliferous basins of China, gaining considerable achievements. Specifically, an innovative integrated evaluation technique for conventional and unconventional hydrocarbon resources has been developed based on TSM basin modeling, overcoming the limitations of traditional evaluation methods. Accordingly, it has been proposed that understanding the differential evolutionary patterns of the hydrocarbon generation, retention, and expulsion of various source rocks is the key to integrated resource evaluation. The new technique reveals the genetic relationship and synergistic evolution process across the whole sequence of hydrocarbon resources, providing an important guidance for

收稿日期: 2025-08-22; 修回日期: 2025-10-18。

第一作者简介: 胡宗全(1971—), 男, 教授级高级工程师, 油气勘探研究与生产管理。E-mail: huzongquan_syky@sinopec.com。

通信作者简介: 宋振响(1983—), 男, 高级工程师, 油气资源评价。E-mail: songzx_syky@sinopec.com。

基金项目: 中国石油化工股份有限公司科技攻关项目(P23230); 国家科技重大专项(2024ZD1400101)。

integrated resource evaluation and decision-making for resource exploration. What's more, the overall resource structure manifests as a decrease in conventional original in-place resources alongside a substantial increase in unconventional original in-place resources. These characteristics result in a resource configuration featuring balanced proportions of oil and gas resources, along with stable conventional resources and increased unconventional resources. This analysis also confirms that major basins remain the primary domain for significant exploration breakthroughs. At last, given the discovery rates and distribution characteristics of hydrocarbon resources, the orderly progression from conventional to unconventional oil and gas provides a robust resource foundation for stabilizing oil production while increasing gas output ("stabilizing oil, increasing gas"). Primary targets for future integrated exploration of conventional and unconventional hydrocarbon resources include the Paleogene strata of the Bohai Bay Basin, the Cambrian, Permian, and the Jurassic strata of the Sichuan Basin, and the Carboniferous-Permian and Triassic strata of the Ordos Basin.

Key words: hydrocarbon generation-retention-expulsion mechanism, China's 14th Five-Year Plan, exploration target, integration of conventional and unconventional hydrocarbon resources, resource evaluation

引用格式:胡宗全,宋振响,周卓明,等. 常-非一体油气资源分布规律与勘探策略[J]. 石油与天然气地质,2025,46(6):1778-1791. DOI:10.11743/ogg20250603.

HU Zongquan, SONG Zhenxiang, ZHOU Zhuoming, et al. Distribution patterns and integrated exploration strategy for conventional and unconventional hydrocarbon resources[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(6): 1778-1791. DOI: 10.11743/ogg20250603.

“十四五”以来,中国油气勘探逐步进入常规与非常规并重的发展阶段,“全油气系统理论”^[1-3]的提出和兴起有力推动了对常规与非常规油气成因联系与分布规律研究的热潮。自然资源部牵头制定的《油气矿产资源储量分类》新国家标准^[4]颁布实施,重新界定了资源量的内涵,对新形势下开展油气资源评价工作提出了更高要求,在此背景下,于2022年正式启动了“十四五”全国油气资源评价工作。

油气资源评价最初主要针对常规油气展开,随着勘探开发程度的不断提高,对烃类排出效率、聚集效率等关键参数的认识逐步深化,常规油气资源评价方法体系^[5-6]也日趋成熟和完善。近年来,非常规油气在勘探开发中不断取得突破,页岩油气和煤层气等滞留于烃源岩层系内的油气资源日益受到重视。然而,当前针对非常规油气资源量的估算多采用体积法和类比法,或基于总生烃量的一定比例粗略估算,尚未系统引入盆地模拟法^[7-9]。这种将常规和非常规油气分开评价的做法,不仅缺乏全油气系统层面的整体约束,导致两类资源配比关系不明确,还容易造成大量重复工作,降低资源评价的整体效率及结果的可信度。

为此,本文攻关团队以中国石化承担的油气资源评价任务为契机,基于常规与非常规油气“同源共生”的核心认识,提出了针对不同类型烃源岩的“生-滞-排”机理,建立了常-非一体油气资源评价新技术,并配套研发了相应软件模块,为常规与非常规油气资源的协同评价奠定了基础。通过系统评价,进一步摸清

了评价区内常规与非常规油气的资源家底和分布规律,明确了重点盆地常规与非常规油气协同勘探的有利方向,相关评价成果将为中国石化勘探规划方案编制与高质量勘探部署提供重要支撑。

1 常-非一体油气资源评价新技术

目前,学术界已广泛认同常规与非常规油气资源在含油气盆地中具有“同源共生、有序分布、差异富集”的特征。这一认识推动了油气资源评价范式的重大转变:评价对象由早期的常规油气为主转向常规与非常规并重,评价方法从以储层为核心的类比法、体积法转向以烃源岩为核心的成因法^[10-13],尤其是符合全序列油气资源协同共生的成因法。

1.1 方法原理

全油气系统理论是传统含油气系统和油气成藏体系理论的丰富和拓展。该理论以一套或多套相互关联的烃源岩为核心,旨在对其所生成油气经历的生一排一运一聚全过程及其所涉及的全部地质要素进行系统性研究与评价^[14]。传统的资源评价方法通常在对常规油气资源形成明确认识后再采用其他方法估算非常规油气资源,这种工作流程显然不符合常-非一体理念。此外,早期基于成因法的资源评价主要依赖于对烃源岩生烃与排烃机理的认识,尽管前人^[15-16]在这方面开展了大量的研究工作,但排烃量与生烃量之间

的比例往往受宏观上常规资源量认识的约束,存在宏观规律约束微观机理的现象,导致关键参数取值依据不足。本研究提出的烃源岩“生-滞-排”机理,不只是术语的扩展,更体现了地质机理认识上的深化。该机理强调,在烃源岩演化早-中期,生成的烃类优先滞留在烃源岩层内,直至中-晚期才开始逐渐排出烃源岩体系外。因此,烃源岩“生-滞-排”模式能够更严谨、更真实地刻画烃源岩的演化过程。另外,该理念也进一步揭示了烃源岩微观生烃、滞留和排烃机理,从根本上控制了宏观的资源结构,并最终决定了全序列油气的资源规模。

近年来,中国石化自主研发的基于地层孔隙空间的烃源岩生-滞-排热压模拟实验^[17]和源-储协同成烃成藏演化实验技术,为定量评价不同演化阶段滞留油量、排出油量及烃气产率提供了关键参数,也为成因法在常-非一体资源评价中的应用奠定了坚实基础。与传统的体积法和类比法相比,常-非一体油气资源评价新方法具有以下两个显著优势:①从油气来源出发,充分考虑油气生-滞-排-运-聚全过程,实现了常规与非常规油气的协同评价;②基于TSM盆地模拟技术开展常-非一体油气资源评价,可清晰揭示不同类型油气的成因联系、空间分布与动态演化过程,为全序列油气资源量计算和勘探部署提供关键支撑。

1.2 方法实现

在全油气系统理论和烃源岩完整生-滞-排油气演化模拟技术的指导下,中国石化油气资源评价团队针对常规与非常规油气“同源异储”的特征,将实验室

揭示的“源-储协同演化、源-藏差异演化”模式与油气形成演化过程结合,创新建立了基于TSM盆地模拟的常-非一体油气资源评价技术(图1)。该技术方法主要包括两个部分:①基于近实际地质条件下烃源岩的滞留油产率、源内烃气产率和源-储耦合^[18]特征分析,计算源内滞留油气量以及页岩油气和煤层气等非常规油气资源量;②基于排出油产率、排出烃气产率和油气成藏配置关系计算排烃量及常规-致密油气资源量。

相较于传统仅聚焦于常规油气的盆地模拟方法,常-非一体油气资源评价技术的核心突破在于:从常规与非常规油气同源共生的统一成因出发,将烃源岩体系内的“生-滞”过程与油气排出后的“运-聚”成藏过程纳入一个统一的动力学框架内进行整体模拟,借助TSM盆地模拟技术实现常规、非常规油气资源的一体化定量评价^[13]。与传统方法相比,新方法涵盖了油气资源全序列和油气生-滞-排-运-聚演化全过程的评价,因此,它能够真正满足当前油气勘探对常规与非常规资源进行一体化、协同化评价的战略需求。

1.3 烃源岩生-滞-排机理及演化模式

常-非一体油气资源评价的核心在于烃源岩“生-滞-排”油气演化模式的获取,该模式的建立主要依赖于在近地质条件下开展的地层孔隙热压模拟实验^[17],并结合深入的地质分析予以综合确定。中国含油气盆地不同层系烃源岩在沉积组构(块状、层状和纹层状)、岩性-岩相组合(硅质型、钙质型、黏土型、炭质型和混合型)、有机质类型(I型、II₁型、II₂型和III型)及有机质丰度(高、中和低)等方面存在显著差异,这些因素直

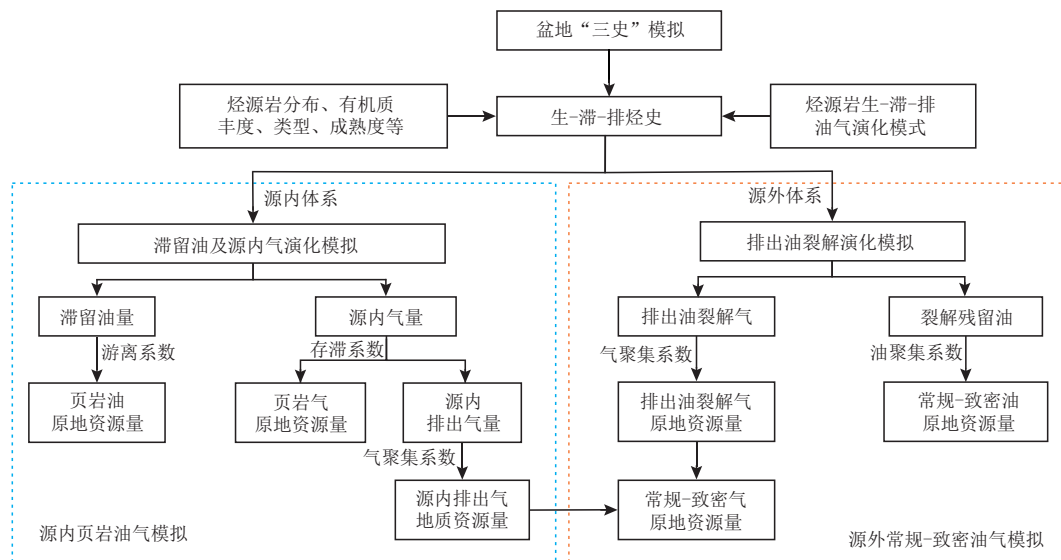


图1 基于TSM盆地模拟的常规-非常规油气资源一体化评价技术

Fig. 1 Flow chart of the integrated evaluation technique for conventional and unconventional hydrocarbon resources based on TSM basin modeling

接控制了烃源岩的生烃、滞留与排烃过程,进而影响到常规和非常规油气原地资源量的规模。

为系统揭示这一过程,本研究选取了海相深水陆棚相、陆相淡水湖泊相及煤系沼泽相3类典型烃源岩样品作为研究对象。实验设计首先依据烃源岩生、排烃演化阶段划分,确定预期模拟的成熟度(镜质体反射率 R_o)和温度点;再结合样品所在区域典型井的埋藏史与热演化史,确定各模拟温度所对应的埋深、静岩压力和流体压力;最终在半开放体系下开展热压模拟实验,以获取烃源岩完整的生-滞-排油气演化模式。实验结果表明,尽管这3类烃源岩总体上经历了相似的演化过程,但其滞留油产率、排出油产率与烃气产率以及三者之间的比例关系存在显著差异(图2)。

1.3.1 海相陆棚相烃源岩

海相陆棚相烃源岩演化过程如下:①滞留油产率呈“先升后降”的趋势。烃源岩在 $R_o = 0.5\%$ 时进入生油门限,早期生成的油主要以吸附态赋存在烃源岩体系内;滞留油产率在 $R_o = 0.7\%$ 时达100 mg/g以上,在 $R_o = 0.8\% \sim 0.9\%$ 时达到峰值(约200 mg/g);随着热裂解作用增强,滞留油产率开始下降, $R_o = 1.2\% \sim 1.3\%$ 时已不足100 mg/g;之后进入干酪根大量生烃气和滞留油大规模裂解阶段,演化末期滞留油产率降低至10 mg/g以下。总体看来, $R_o = 0.7\% \sim 1.2\%$ 时滞留油产率最

高,有利于页岩油的富集。②排出油产率呈“先升后稳”的趋势。从进入生油门限至 $R_o = 0.7\%$ 附近,排出油产率逐渐增加至80 mg/g,排油效率(排出油产率占滞留油与排出油产率总和的比例)为30%~40%; $R_o = 0.9\% \sim 1.0\%$ 附近排出油产率快速增加至300 mg/g以上,排油效率也超过60%;随着热演化程度的升高,排出油产率继续升高并稳定在350 mg/g左右。③烃气产率呈“早期停滞、中期快速上升、晚期趋于稳定”的特征。烃源岩在低成熟演化阶段($R_o = 0.7\%$)主要以生油为主,基本不生气; $R_o = 0.8\%$ 时开始进入生气阶段; $R_o = 1.2\%$ 之后进入大量生烃气阶段; $R_o = 1.8\%$ 时烃气产率迅速升高至220 mg/g以上,之后烃气产率缓慢增加并稳定在240 mg/g左右(图2a)。

1.3.2 陆相湖泊相烃源岩

陆相湖泊相烃源岩的生-滞-排油气演化过程具有如下特征(图2b):①滞留油产率呈“先升后降”趋势。烃源岩在 $R_o = 0.5\%$ 时进入生油门限, $R_o = 0.7\%$ 时滞留油产率超过110 mg/g, $R_o = 0.9\% \sim 1.1\%$ 时滞留油产率达到峰值(约380 mg/g)。与海相陆棚相烃源岩相比,达到滞留油产率峰值阶段略晚,但产率更高;之后滞留油开始进入裂解阶段, $R_o = 1.5\%$ 时其产率降低至100 mg/g以下,演化末期进一步降低至10 mg/g以下。整体来看, $R_o = 0.8\% \sim 1.2\%$ 时滞留油产率较高,

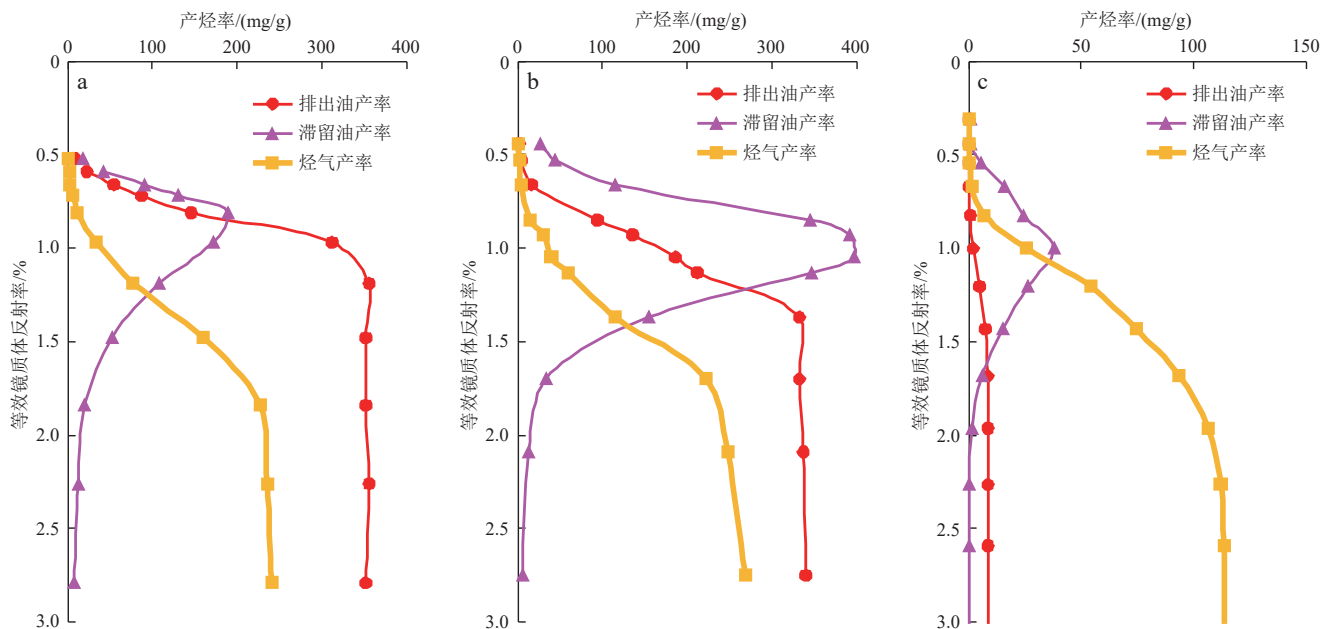


图2 不同沉积环境典型烃源岩生-滞-排油气模式

Fig. 2 Diagrams showing the hydrocarbon generation, retention, and expulsion patterns of typical source rocks under different sedimentary environments

a. 海相陆棚相; b. 陆相湖泊相; c. 煤系沼泽相

有利于页岩油的富集,咸水湖盆型烃源岩滞留油产率高可提前至 $R_o = 0.7\%$ 时。②排出油产率呈“先升后稳”的趋势。从生油门限至 $R_o = 0.7\%$,排出油产率缓慢增加至 20 mg/g ,排油效率不足 15% ,明显低于同演化阶段海相陆棚相烃源岩; $R_o = 1.1\%$ 时排出油产率快速增加至 200 mg/g 以上,排油效率也超过 30% ,而相同演化阶段海相陆棚相烃源岩排油效率已超 60% ;随热演化程度进一步升高,排油产率进一步升高并稳定在 330 mg/g 左右。③烃气产率呈“早期停滞、中期快速上升、晚期趋稳”的特征。烃源岩在低熟演化阶段($R_o \leq 0.7\%$)基本不生气, $R_o = 0.8\% \sim 1.0\%$ 时逐渐进入生气阶段, $R_o = 1.3\%$ 之后进入大量生烃气阶段, $R_o = 2.0\%$ 时烃气产率迅速升高至 240 mg/g 以上,之后烃气产率缓慢增加并稳定在 260 mg/g 左右。

1.3.3 煤系烃源岩

煤系烃源岩特定的沉积环境和生烃母质的性质决定了其独特的生-滞-排油气演化过程(图2c)。煤系烃源岩在成熟演化阶段($R_o = 0.7\% \sim 1.3\%$)仅能生成少量油,滞留油和排出油产率总和基本不超过 50 mg/g ,且所生成的油主要以吸附态滞留在烃源岩体系内部,无法有效排出; $R_o = 1.0\%$ 时排油效率仅 10% 左右,实际地质条件下可能更低,因此难以形成规模性原油富集。煤系烃源岩的烃气产率同样经历了“早期停滞、中期快速上升、晚期趋稳”的演化过程:在低成熟演化阶段($R_o \leq 0.7\%$)基本不生气; $R_o = 0.7\% \sim 0.9\%$ 时逐渐进入生气阶段,烃气产率一般低于 20 mg/g ;在 R_o 升至 1.3% 之后进入大量生烃气阶段,产率迅速攀升至 100 mg/g 以上;随后烃气产率缓慢增加并稳定在 115 mg/g 左右,具备形成源内煤层气和源外常规气的生烃潜力。

从3类典型烃源岩的生-滞-排油气产率特征可以看出(表1),海相陆棚相烃源岩总体表现出较高的排出油产率、排油效率和烃气产率,滞留油产率中等;陆相湖泊相烃源岩具有较高的滞留油、排出油和烃气产率,排油效率中等;而煤系烃源岩以形成天然气资源为主。需要指出的是,图2和表1中所展示的3个样品仅

反映了3类不同烃源岩在半开放体系下生-滞-排油气演化模式的差异。实际地质条件下,烃源岩生-滞-排油气演化过程受沉积相带、有机质类型、成熟度和沉积组构等多种因素共同控制。因此,在资源评价工作中,必须要结合实际地质条件确定适用的烃源岩生-滞-排油气演化模式,从而为合理估算常规与非常规油气资源量提供科学依据。总体看来,中国海相烃源岩时代老、热演化程度高,主要形成常规-致密气和页岩气资源;陆相烃源岩多处于低成熟-成熟演化阶段,以形成常规-致密油和页岩油资源为主;煤系烃源岩则应聚焦高-过成熟阶段源内煤层气与源外常规气勘探。

除烃源岩外,储层作为油气赋存与产出的载体,也是油气成藏研究的关键。目前,针对常规碎屑岩和碳酸盐岩储层形成机理、储集空间类型和分布规律的认识已相对清楚,而对于非常规储层(如页岩、煤层)微纳米级孔-缝系统形成演化过程、流体赋存机制及储层非均质性的认识仍处于探索阶段。与常规油气不同,非常规油气通常表现为“源内滞留”和“近源富集”特征,其中源-储配置关系对页岩油气富集高产具有决定性作用。烃源岩和储集层在演化过程中常呈现“协同演化、动态耦合”的特点,二者在时间、空间及物性演化上密切相关。非常规储层的孔隙演化受有机质生烃和无机成岩作用的双重控制^[19]:在早成岩阶段,无机矿物构成刚性矿物格架,为低成熟阶段生成的液态烃提供滞留空间;随着热演化程度增加,黏土矿物转化影响烃类的生成与赋存状态,无机孔的发育促进页岩油富集与可动性^[20];至高-过成熟阶段,滞留在烃源岩内的页岩油开始裂解生成页岩气和沥青,同时有机质孔大量发育,为页岩气的富集创造了有利条件^[21]。在此基础上,有学者^[18]将页岩油气的源-储耦合关系划分为3类,并系统阐述了不同源-储耦合类型协同演化过程及其控烃机制,为常-非一体勘探提供了重要的理论依据。

2 常-非一体油气资源分布规律

“十四五”以来,中国石化在重点盆地常-非一体

表1 典型海相(陆棚相)、陆相(湖泊相)及煤系(沼泽相)烃源岩生-滞-排烃产率特征对比

Table 1 Comparison of hydrocarbon yields, hydrocarbon retention rates, and hydrocarbon expulsion efficiency of typical marine (shelf), continental (lacustrine), and coal-measure (swamp-facies) source rocks

烃源岩类型	滞留油		排出油(未考虑裂解)			烃气	
	峰值阶段 $R_o/\%$	峰值产率/(mg/g)	峰值阶段 $R_o/\%$	峰值产率/(mg/g)	排油效率/%	峰值阶段 $R_o/\%$	峰值产率/(mg/g)
海相陆棚相	0.8 ~ 0.9	~ 200	1.0 ~ 1.5	~ 350	60 ~ 85	1.8 ~ 3.0	~ 230
陆相湖泊相	0.9 ~ 1.1	~ 380	1.3 ~ 1.5	~ 330	50 ~ 70	1.7 ~ 3.0	~ 250
煤系沼泽相	0.9 ~ 1.1	~ 40	1.4 ~ 1.7	8 ~ 10	30 ~ 50	1.7 ~ 3.0	~ 100

表 2 “十四五”以来中国石化重点盆地常-非一体领域勘探突破情况

Table 2 Breakthroughs in the integrated exploration of conventional and unconventional hydrocarbon resources in major petroliferous basins achieved by SINOPEC since the implementation of China’s 14th Five-Year Plan

重点盆地	常-非一体资源组合	勘探突破情况
渤海湾盆地	济阳坳陷古近系深层致密油和多类型页岩油	济阳坳陷东营-渤南沙四下亚段-孔店组 GX86 等多口井获高产,新增三级储量近亿吨,拓展了深层致密油勘探空间;页岩油领域实现 5 个洼陷、3 种岩相及 2 套层系的全面突破,发现了新兴、新丰和新河 3 个新油田,落实页岩油探明地质储量 1.4×10^8 t,提前完成国家示范区目标任务
	东濮凹陷古近系致密油-页岩油	葛岗集洼陷带、西南洼新区沙三段-沙四段、前梨园洼陷沙三段页岩油等领域获新突破,打开了洼陷带源内、源上致密油+页岩油立体勘探新局面
四川盆地	震旦系-寒武系相控丘滩型常规气和新类型页岩气	川北和川南震旦系灯影组勘探发现好苗头,YS1 井测试获突破;川西井研-犍为和资阳寒武系超深层页岩气勘探获重大突破,ZY2 等多口井获高产,新增控制+预测储量超 $5\,000 \times 10^8$ m ³ ,坚定了超深层页岩气规模增储建产信心
	志留系新类型页岩气	落实川南“丁-东-新”大型富气带,新发现了綦江页岩气田;新培育川东南盆缘复杂构造带平桥-东胜和阳春沟 2 个规模增储新阵地,探明+控制地质储量超 $3\,000 \times 10^8$ m ³ ;盆外常压页岩气多点突破,预计可提交预测储量超 $2\,000 \times 10^8$ m ³
	二叠系页岩气-煤层气	川东红星和川北普光地区二叠系多层系(大隆组、吴家坪组和茅口组)页岩气获重大突破,展现出 2 个超万亿方资源规模阵地;南川二叠系龙潭组部署实施 Y2 井率先实现盆地深层煤层气勘探突破
	三叠系-侏罗系致密气	川西合兴场须家河组新增探明地质储量超十亿方,新培育川北元坝-巴中-通江-马路背千亿方增储阵地;川北和涪陵侏罗系河道砂岩致密气及须家河组“断缝体”致密气勘探获突破;普光须家河组致密气取得商业发现
	侏罗系页岩油-页岩气	川东复兴地区侏罗系页岩油取得勘探突破,探明页岩油地质储量超 $2\,000 \times 10^4$ t,页岩气超百亿方,发现了四川盆地第一个页岩油田;评价侏罗系页岩油资源量超十亿吨,页岩气超万亿方
鄂尔多斯盆地	三叠系致密油	鄂南旬宜和彬长探区断缝体致密油多点突破,形成千万吨级增储阵地
	石炭系-二叠系致密气-煤层气	杭锦旗地区上古生界探明致密气地质储量超十亿方,成为盆地北缘第二个超十亿方气区;鄂北大牛地气田 YM1HF 井获得深层煤层气重大突破,首次提交预测储量,鄂南延川南地区提交煤层气探明地质储量超 200×10^8 m ³
准噶尔盆地	腹部二叠系-三叠系常规油气-致密油气	四大凹陷在二叠系-三叠系邻源地质体领域持续突破,展现出万亿方资源规模大气区前景
	山前带二叠系致密油-页岩油	准北哈山山前带风城组油气勘探取得重要进展,HS5 井峰值日产油量 95.8 m ³ ,上报预测地质储量超 $3\,000 \times 10^4$ t
苏北盆地	古近系中-低丰度页岩油	溱潼凹陷率先突破,落实页岩油探明地质储量 0.4×10^8 t;高邮、海安和金湖等凹陷均试获高产工业油流,取得中-低有机质丰度页岩油勘探突破,保有三级地质储量约 1.8×10^8 t

勘探中取得了多项重大突破^[22-23](表 2),特别是在致密碎屑岩、页岩油气和煤层气等非常规领域勘探进展迅速,标志着中国石化已全面进入常-非一体油气勘探新阶段。

根据“十四五”全国油气资源评价工作要求,本轮资源评价矿权范围以 2022 年底为基准,与国内其他石油公司相比,中国石化矿权区在资源禀赋方面存在天然劣势。截至 2022 年底,中国石化拥有的国内油气勘查总面积约占全国的 15%,且矿权呈现“数量多、面积小、分布散”的特点,主要分布在大型盆地的边缘、腹部以及诸多中、小型盆地。面对这一现实条件,“十四五”期间,中国石化通过对所属探区的陆上及海域 42 个盆地和地区开展了系统的常规与非常规油气资源评价,全面摸清了评价区内资源家底,为后续勘探布局与战略规划奠定了坚实基础。

2.1 油气资源结构

从整体评价结果来看(图 3),评价区内的源外常规油气与致密油气原地资源量略有下降,而源内非常规油气原地资源量显著增长。具体来看,常规油-致密油原地资源量总体较“十三五”减少约 2.4%,常规-致密气原地资源量总体减少约 12.4%。其中,减少的部分主要为常规油气,而致密油气原地资源量均有增加,特别是致密油原地资源量增幅达 117.5%。页岩油原地资源量较“十三五”大幅增加 124.8%,页岩气略减少 2.3%,煤层气原地资源量大幅增加 176.3%。

“十四五”油气资源评价结果显示,评价区内油气资源结构呈现两个显著特征:①油/气比例趋于均衡。本次评价石油和天然气原地资源量比例约为 1.00:1.10,而“十三五”期间油/气比例约为 1.00:1.41,在天

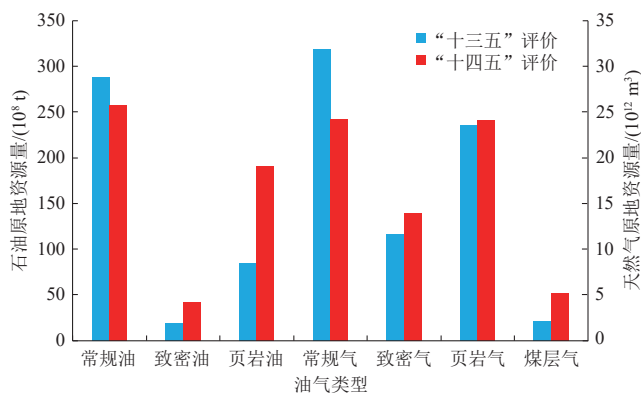


图3 评价区内不同类型油、气原地资源量对比柱状图

Fig. 3 Comparison of the initial in-place resources of various types of hydrocarbon resources within the evaluation areas

然气原地资源量基本稳定的情况下,比例变化主要源于页岩油原地资源量的大幅增长。②非常规油气占比明显提升。本次评价常规(常规油气和致密油气)与非常规(页岩油气和煤层气)油气比例约为1.00:0.70,较“十三五”评价的常/非油气比例(1.00:0.44)明显提高,在常规油气原地资源量规模基本保持稳定的背景下,常/非油气比例变化主要得益于非常规油气的大幅增加。综合分析,中国石化已由早期“常规油气为主”的勘探阶段,迈入当前“油气并举、常稳非增”的勘探新阶段。

2.2 常-非油气原地资源量分布

2.2.1 石油原地资源量

从评价区石油原地资源量分布(图4)来看,渤海湾盆地“一枝独秀”,其原地资源量占评价区总石油原地资源量的50.0%,与“十三五”评价结果相比,该盆地常规-致密油原地资源量增加约19.0%,主要基于古近系深层勘探进展和风暴滩坝沉积新认识,评价致密油原地资源量增加 $20.07 \times 10^8 \text{ t}^{[24]}$ 。同时,基于低-中成熟度页岩油富集与可动性新认识^[25]评价的页岩油原地资源量大幅增加130.0%。盆地资源结构也由此前的常规油为主,转变为当前常规-致密油与页岩油并重的格局。

在四川、准噶尔和鄂尔多斯盆地,得益于页岩油勘探突破和地质认识的深化,页岩油原地资源量显著增长,而常规-致密油资源规模总体保持稳定。评价四川盆地东北地区侏罗系页岩油原地资源量近 $20.0 \times 10^8 \text{ t}$,较“十三五”显著提升。该区侏罗系纵向上发育自流井组东岳庙段、大安寨段和凉高山组3套优质页岩,整体上进入了中-高热演化阶段,已在川东复兴和

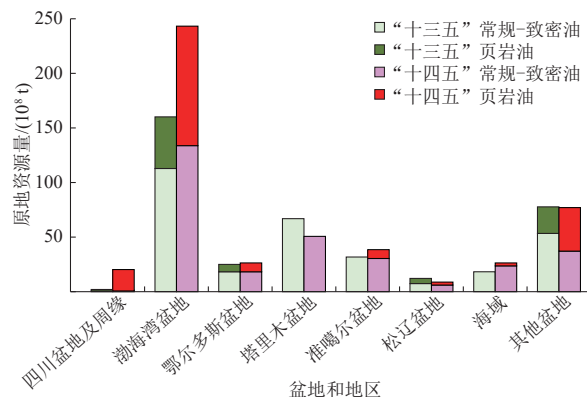


图4 评价区内不同盆地、不同类型石油原地资源量分布柱状图

Fig. 4 Distributions of the initial in-place resources of various types of oil across different petroliferous basins within the evaluation areas

红星以及川北巴中和普光矿权区实现勘探突破^[26]。准噶尔盆地在常规油原地资源量未发生明显变化的情况下,新评价盆地西北缘和南缘二叠系页岩油原地资源量 $7.7 \times 10^8 \text{ t}$ 。鄂尔多斯盆地常规-致密油基本保持稳定,页岩油略有增加。

松辽盆地评价区内常规-致密油和页岩油原地资源量小幅下降,页岩油原地资源量减少的原因主要是本次仅评价了青山口组一段页岩油,不包括嫩江组低熟页岩油(该层段烃源岩整体处于低成熟度演化阶段,当前工程技术条件下尚难有效动用)。

塔里木盆地由于受埋深大、页岩油资源条件认识不清等因素影响,本次仅评价了常规油。评价区内常规油原地资源量较“十三五”减少约24.0%,主要是新井的钻探揭示台盆区玉尔吐斯组烃源岩分布范围及生烃品质发生较大变化;另外,基于新补充的刻度区解剖成果^[27]适当调整了常规油运聚系数,导致生烃量及原地资源量相应降低。

其他中、小型盆地石油总原地资源量变化不大,但资源结构发生明显转变,表现为常规-致密油原地资源量减少及页岩油原地资源量大幅增加,常/非油气比例由1.00:0.46变为1.00:1.07,表明中、小型盆地优质烃源岩发育层系也具备页岩油资源勘探前景。

2.2.2 天然气原地资源量

评价区内,四川盆地以占天然气总原地资源量56.4%的绝对优势居于首位,与“十三五”相比,该盆地常规-致密气原地资源量增加约10.0%,在常规气基本稳定的情况下,致密气原地资源量增加了 $1.47 \times 10^{12} \text{ m}^3$,主要得益于茅(茅口组)一段^[28]、下沙溪庙组^[29]等新层系的勘探突破;页岩气原地资源量较“十三五”

增加 20.7%,不同层系间资源分化显著,奥陶系五峰组-志留系龙马溪组页岩气原地资源量减少约 15.7%,主要是本次评价剔除了盆内过成熟度演化区和盆缘构造复杂区;寒武系页岩气原地资源量增幅超过 100.0%,主要是基于川南寒武系拉张槽外新类型页岩和拉张槽内深层-超深层页岩气的重大勘探突破^[30-31],深化了粉砂质页岩源-储配置认识;二叠系页岩气原地资源量亦呈现翻倍增长,主要是得益于普光大隆组^[32-33]和红星地区吴(吴家坪组)二段、茅三段^[34]新层系的突破和薄层富碳页岩富集规律的认识。四川盆地侏罗系页岩气原地资源量增幅也超过 80.0%;此外,四川盆地及周缘地区的南川等区块深层煤层气资源的再认识带来煤层气原地资源量增幅达 46.4%(图 5)。

除四川盆地外,鄂尔多斯、松辽、准噶尔和渤海湾盆地评价区也展现出常规与非常规天然气有序共生的潜力。鄂尔多斯盆地常规-致密气原地资源量增长约 21.2%,在常规气未发生明显变化的前提下,主要是对盆地南部暗色泥岩和海相碳酸盐岩层系生烃潜力产生了新认识,盆缘过渡带致密气勘探潜力显著拓展。页岩气原地资源量有所减少,主要是基于勘探新进展认为三叠系不具备页岩气勘探潜力,二叠系页岩气也未获得实质性突破;相比之下,随着深层煤层气的突破及对深部煤储层和富气机理的深化认识,煤层气原地资源量大幅增加到 $1.82 \times 10^{12} \text{ m}^3$,区内首口深层煤层气风险探井阳煤 1HF 井峰值产量超 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ^[35],显示出巨大勘探潜力。

前期研究揭示,准噶尔盆地具备常规和非常规天然气一体化勘探前景^[36],“十四五”评价区内常规-致密气原地资源量增加近 $1.00 \times 10^{12} \text{ m}^3$,主要基于对二

叠系主力烃源岩成熟度的新认识。前期评价以油为主,随着盆地中部地区深层-超深层天然气的勘探突破^[37]以及对碱湖^[38]和咸化环境烃源岩生、排烃特征的新认识,资源结构发生了变化;本次还新评价了盆地东部及南缘煤层气原地资源量超 $0.30 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。渤海湾盆地本次仅评价了常规气和煤层气,其中常规气原地资源量基本保持稳定,新评价石炭系-二叠系煤层气原地资源量超 $0.50 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

塔里木盆地和海域评价区内仅评价了常规气。塔里木盆地主要基于勘探进展、玉尔吐斯组烃源岩和刻度区解剖成果的新认识^[27],评价常规气原地资源量较“十三五”减少 50.0%。海域评价区内常规气原地资源量较“十三五”也减少了 27.8%,主要原因是基于井-震资料重新刻画了暗色泥岩、炭质泥岩和煤的厚度,新采集的烃源岩生-排烃模拟实验也显示煤系烃源岩产气率降低 15%~20%;同时,根据刻度区解剖的最新研究成果,天然气运聚系数取值有所降低。

其他盆地和地区天然气原地资源量总体呈下降趋势,常/非天然气比例也由 1.00:1.87 变为 1.00:4.60,反映页岩气和煤层气等非常规资源已成为外围中、小型盆地的主要资源类型。

3 重点盆地常-非一体油气勘探方向

3.1 勘探形势

根据 2020 年颁布的国家标准《油气矿产资源储量分类》(GB/T 19492—2020)^[4]和“十四五”全国油气资源评价工作要求,资源量指扣除三级储量后的未发现资源量。截至 2023 年底,评价区常规油资源发现率(三级储量占原地资源量的比例)为 44.7%,致密油为 31.7%,页岩油为 10.7%;常规气资源发现率为 17.8%,致密气为 40.2%,页岩气为 9.9%,煤层气为 3.3%(图 6)。

常规油整体呈现“原地资源量大、资源发现率高”的特点。尽管整装大型油气田的发现难度日益增大,但其资源量仍接近 $150 \times 10^8 \text{ t}$,在近中期仍将是中国原油稳产的“压舱石”。致密油具有“原地资源量小、发现率中等”的特点,可以作为常规油的重要接替和补充。页岩油则表现为“原地资源量大、资源发现率低”的特征,其地质资源量首次超过常规油,在常规油产量逐年递减的背景下,页岩油规模增储和有效上产对实现原油产量稳中有升至关重要,但目前页岩油资源量向储量、储量向产量、产量向效益的转化率总体仍较低,下

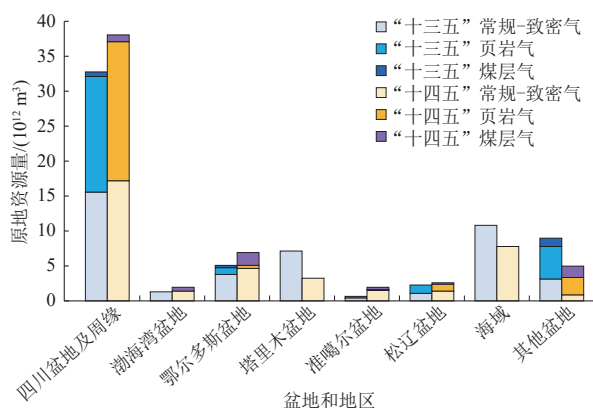


图5 评价区内不同盆地、不同类型天然气原地资源量分布柱状图

Fig. 5 Distributions of the initial in-place resources of various types of natural gases across different petroliferous basins within the evaluation areas

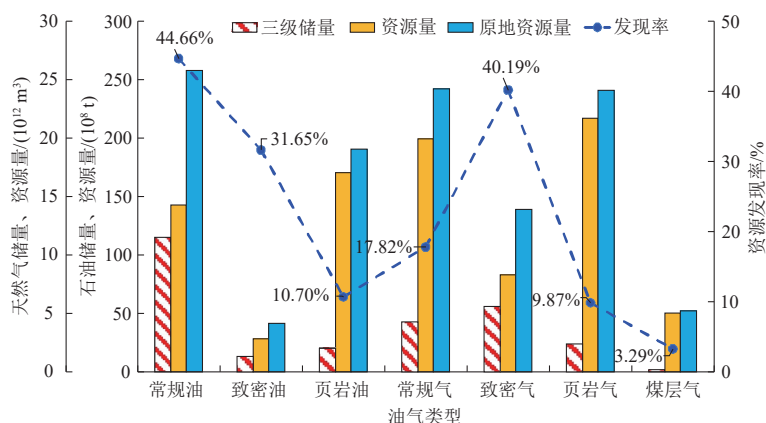


图6 评价区内不同类型油、气储量、资源量及发现率分布柱状图

Fig. 6 Discovered and undiscovered petroleum initially-in-place, as well as discovery rates of various hydrocarbon resources within the evaluation area

一步亟需加强页岩油立体井网压裂改造和原位转化等关键核心技术^[39-40]攻关,以支撑其实现规模效益开发。

天然气资源发现率较石油总体偏低。常规气呈现“原地资源量大、资源发现率低”的特征,其资源发现率明显低于常规油和致密气,主要原因在于常规气主体赋存在陆上深层-超深层、隐蔽领域和海域,资源发现和勘探难度大,且面临着地质认识、工程适应性和开发经济性等多重挑战。随着“深地工程”和“蓝海战略”的持续推进,这部分资源潜力有望逐步释放。致密气仍具有一定规模的原地资源量,资源发现率中等,是常规气和页岩气的重要补充。页岩气表现为“原地资源量大、资源发现率低”的特点,其原地资源量已超过常规气,但资源发现率不足10.0%。目前,中国石化已在四川盆地东南复杂构造区志留系实现了深层和盆缘常压页岩气的突破,落实了继涪陵页岩气田之后的第二个万亿方资源阵地;同时在川中寒武系、川东二叠系和川东北侏罗系也实现新层系突破,页岩气勘探成功实现了“走出涪陵、走出志留系”的战略目标^[23]。然而,当前中国页岩气探明储量和产量仍主要集中在四川盆地及周缘的五峰组-龙马溪组^[41],其他盆地和地区虽有零星发现,但距实现商业开发仍有较大差距。

与其他类型资源相比,煤层气的勘探开发进程相对滞后,总体仍处于起步阶段。目前仅在鄂尔多斯盆地和滇东-黔西地区提交了煤层气储量,资源发现率仅3.3%,但新评价原地资源量超 $5 \times 10^{12} \text{ m}^3$,显示出良好的勘探前景。

3.2 常-非一体重点勘探方向

以上资源评价结果表明,除塔里木盆地和海域评价区仍以常规油气为主外,其他盆地和地区已普遍呈

现常规与非常规油气有序共生、协同分布的格局,标志着中国石化已全面进入常-非一体的勘探新阶段,下一步应以重点盆地常-非油气分布规律研究为牵引,系统推进全序列油气的勘探突破。

3.2.1 渤海湾盆地常规油-致密油-页岩油一体勘探

渤海湾盆地济阳拗陷先后经历了5个勘探阶段^[42]。“十四五”以来,评价区内共取得11个油气新发现,其中非常规7个、常规4个;同时取得了14个商业发现,其中非常规3个、常规11个,展现了常-非并举的良好勘探态势。

从油气来源来看,渤海湾盆地内的常规油、致密油和页岩油主要来自沙(沙河街组)三段和沙四段主力烃源岩。该套烃源岩有机质丰度高、类型好,整体处于生油高峰阶段,以滞留油为主,滞留比例普遍超过50%,为页岩油大规模富集奠定了重要物质基础。排出油离开烃源岩体系后,主要通过渗透性砂体、不整合面和通源断裂进入储集体,形成常规-致密油。烃源岩、储层物性变化和多期断裂组合共同控制了常规-致密油气运聚成藏和页岩油气原位滞留富集,在纵、横向上形成页岩油-致密油-常规油的有序分布格局^[42-43]。“十四五”资源评价结果显示,渤海湾盆地评价区内常规油资源规模基本保持稳定,而致密油和页岩油资源量分别增加了 $20 \times 10^8 \text{ t}$ 和 $60 \times 10^8 \text{ t}$,特别是济阳拗陷页岩油“咸化早生、无机控储、源-储一体、超压封存”等成藏富集理论认识,带动了东营、沾化、惠民和车镇4大凹陷全面实现战略突破。2025年3月,中国首个页岩油探明储量——新兴油田页岩油储量通过自然资源部评审,标志着中国陆相页岩油勘探开发进入新阶段。

3.2.2 四川盆地常规气-非常规油气一体勘探

四川盆地是一个超级富气盆地,具有含气层系多、资源类型丰富、资源潜力巨大等特征,目前整体勘探程度和资源发现率相对较低,先后经历了3个勘探阶段^[44]。自2012年涪陵页岩气田发现以来,通过持续深化页岩气富集地质条件和高产规律研究,不断丰富页岩气“二元”富集理论,相继发现了涪陵、威荣、永川和綦江4个页岩气田,也实现了寒武系和二叠系等新层系的突破^[23]。近年来,川东地区侏罗系页岩油气也取得了重大进展。

四川盆地自下而上发育7套烃源岩,分别为震旦系灯影组、寒武系筇竹寺组、奥陶系五峰组-志留系龙马溪组、二叠系栖霞组-茅口组、二叠系龙潭组、上三叠统须家河组及下侏罗统自流井组烃源岩^[45]。其中前4套为海相烃源岩,龙潭组为海-陆过渡相烃源岩^[46],须家河组及自流井组为陆相烃源岩。下侏罗统烃源岩处于成熟演化阶段,既能生油、也能生气,其他层系烃源岩均达到高成熟-过成熟演化阶段,以生气为主。

以烃源岩为核心,根据成藏要素组合关系,可将四川盆地海相层系划分为寒武系、志留系和二叠系3个相对独立的全油气系统,局部受大型断裂控制形成断控复式全油气系统^[47]。受优质烃源岩、规模储层和保存条件联合控制,四川盆地海相油气普遍经历了“多元生烃、油气转化、晚期调整”的动态成藏过程。各海相全油气系统主要发育陆棚相页岩气-台缘相控常规气-台内断-相共控常规气成藏序列,展现出“立体成藏、有序分布”的特征。评价区内常规气与页岩气资源量比例约为1.00:2.63,下一步勘探应聚焦源内和近源领域,重点围绕深层页岩气、大型台缘礁滩相带与大型断控岩性复合体展开。

陆相层系相应形成了以须家河组(气藏为主)和自流井组(油气均有)为烃源岩的2套全油气系统^[48]。纵向上自下而上依次发育源内页岩油气、近源致密油气和远源常规油气,平面上从湖盆中心到盆缘冲断带依次发育拗陷带页岩油气、斜坡带致密油气和隆起带常规油气的全序列成藏体系。须家河组以常规气和致密气为主,侏罗系则以页岩气和致密气为主,评价区内常规与非常规资源量比约为1.00:1.34。此外,侏罗系还具备形成大规模页岩油的勘探潜力。

下一步亟需以全油气系统理论为指导,按照“海-陆并重、油-气协同、常-非一体”的立体综合勘探思路,推动四川盆地油气勘探整体突破。

3.2.3 鄂尔多斯盆地常规-非常规油气一体勘探

鄂尔多斯盆地纵向上发育2套含气层系(下古生界碳酸盐岩和上古生界碎屑岩)和2套含油层系(三叠系延长组和侏罗系延安组)^[49]。该盆地经历了5个勘探阶段^[50],近年来勘探突破主要集中在致密油气领域,尤以石炭系-二叠系致密气与煤层气、三叠系致密油与页岩油的重大发现,成为中国近源和源内勘探的成功实践,也是全油气系统理论的典型例证^[1]。

鄂尔多斯盆地自下而上发育3套主力烃源岩:下奥陶统马家沟组(海相)、上石炭统太原组-下二叠统山西组(海-陆过渡相)以及上三叠统延长组(陆相)。马家沟组和太原组-山西组烃源岩热演化程度高,以大量生气为主;延长组烃源岩主体处于低熟-成熟演化阶段,以生油为主。以烃源岩为核心,可将鄂尔多斯盆地划分为下古生界奥陶系、上古生界石炭系-二叠系^[51]和中生界三叠系-侏罗系3个相对独立的全油气系统。烃源岩和储集层特征及其配置关系决定了不同类型油气的空间分布和富集程度。

评价区内石炭系-二叠系和三叠系均具备常-非一体的勘探潜力。石炭系-二叠系发育源内页岩气-煤层气、近源致密气和远源致密-常规气,常规-致密气、页岩气和煤层气资源量比例约为1.00:0.25:1.00。下一步除继续加大致密砂岩气的勘探力度外,也应高度重视页岩气和煤层气的勘探部署。三叠系-侏罗系主要形成以三叠系烃源岩为核心的全油气系统,从盆内到盆缘依次发育源内页岩油、近源致密油和源上常规油组合,常规-致密油与页岩油资源比例约1.00:0.88,致密油资源发现率已达46.1%,而页岩油尚未取得实质性进展,下一步应充分借鉴庆城页岩油的勘探开发成功经验,加大勘探部署力度,力争早日实现页岩油规模突破。

4 结论

1) 针对传统油气资源评价方法局限性,创新建立了基于烃源岩生-滞-排机理和盆地模拟的常-非一体油气资源评价新技术,烃源岩生-滞-排油气差异演化模式是新方法应用的核心,其受沉积组构、岩相组合、有机质类型和成熟度等联合控制,直接影响常规与非常规油气的资源结构及规模。

2) 评价区内油气资源评价结果表明,常规油气原地资源量总体保持稳定,而非常规油气原地资源量显著增长,标志着勘探阶段已由早期的常规为主转入“常

稳非增”的勘探新阶段。无论常规还是非常规油气,大型盆地仍然是油气勘探发现的主战场,其中渤海湾盆地和四川盆地分别是全序列石油和天然气资源分布的核心区域。

3) 评价区内油气资源发现率总体显示为“油高气低、常规高非高规低”的特征,为实施“稳油增气”战略提供了坚实的资源基础。渤海湾盆地古近系发育1套页岩油-致密油-常规油全油气系统;四川盆地发育3套海相和2套陆相全油气系统;鄂尔多斯盆地石炭系-二叠系发育常规气-致密气-页岩气-煤层气的全油气系统,三叠系则发育1套常规油-致密油-页岩油的全油气系统。这些盆地和重点层系是中国石化下一步实现常-非一体油气勘探突破的关键领域和主攻方向。

致谢:本文是在“十四五”中国石化油气资源评价成果基础上撰写而成。该项工作是在中国石油化工股份有限公司科技发展部、油田勘探开发事业部组织下,由石油勘探开发研究院牵头,联合12家油田分公司共同完成。谨对参与本项目的各位专家学者表示诚挚感谢!

参 考 文 献

- [1] 贾承造, 庞雄奇, 宋岩. 全油气系统理论基本原理[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(4): 679-691.
JIA Chengzao, PANG Xiongqi, SONG Yan. Basic principles of the whole petroleum system [J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(4): 679-691.
- [2] JIA Chengzao, PANG Xiongqi, SONG Yan. Whole petroleum system and ordered distribution pattern of conventional and unconventional oil and gas reservoirs [J]. Petroleum Science, 2023, 20(1): 1-19.
- [3] 庞雄奇, 贾承造, 郭秋麟, 等. 全油气系统理论用于常规和非常规油气资源评价的盆地模拟技术原理及应用[J]. 石油学报, 2023, 44(9): 1417-1433.
PANG Xiongqi, JIA Chengzao, GUO Qiulin, et al. Principle and application of basin modeling technology for evaluation of conventional and unconventional oil-gas resource based on whole petroleum system theory [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(9): 1417-1433.
- [4] 中华人民共和国国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 油气矿产资源储量分类: GB/T 19492-2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Classifications for petroleum resources and reserves: GB/T 19492-2020 [S]. Beijing: Standards Press of china, 2020.
- [5] 郭秋麟, 谢红兵, 黄旭楠, 等. 油气资源评价方法体系与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2016.
GUO Qiulin, XIE Hongbing, HUANG Xunan, et al. Oil and gas resources evaluation methods system and application [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016.
- [6] 宋振响, 陆建林, 周卓明, 等. 常规油气资源评价方法研究进展与发展方向[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(3): 21-31.
SONG Zhenxiang, LU Jianlin, ZHOU Zhuoming, et al. Research progress and future development of assessment methods for conventional hydrocarbon resources [J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(3): 21-31.
- [7] 郭秋麟, 陈宁生, 刘成林, 等. 油气资源评价方法研究进展与新一代评价软件系统[J]. 石油学报, 2015, 36(10): 1305-1314.
GUO Qiulin, CHEN Ningsheng, LIU Chenglin, et al. Research advance of hydrocarbon resource assessment method and a new assessment software system [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(10): 1305-1314.
- [8] 徐旭辉, 周卓明, 宋振响, 等. 油气资源评价方法关键参数研究和资源分布特征——以中国石化探区“十三五”资源评价为例[J]. 石油实验地质, 2023, 45(5): 832-843.
XU Xuhui, ZHOU Zhuoming, SONG Zhenxiang, et al. Methods and key parameters for oil and gas resource assessment and distribution characteristics of oil and gas resource: A case study of resource assessment of SINOPEC during the 13th Five-Year Plan period [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2023, 45(5): 832-843.
- [9] 宋振响, 徐旭辉, 王保华, 等. 页岩气资源评价方法研究进展与发展方向[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(5): 1038-1047.
SONG Zhenxiang, XU Xuhui, WANG Baohua, et al. Advances in shale gas resource assessment methods and their future evolution [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 1038-1047.
- [10] 窦立荣, 李大伟, 温志新, 等. 全球油气资源评价历程及展望[J]. 石油学报, 2022, 43(8): 1035-1048.
DOU Lirong, LI Dawei, WEN Zhixin, et al. History and outlook of global oil and gas resources evaluation [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(8): 1035-1048.
- [11] 贾承造, 庞雄奇, 郭秋麟, 等. 基于成因法评价油气资源: 全油气系统理论和新一代盆地模拟技术[J]. 石油学报, 2023, 44(9): 1399-1416.
JIA Chengzao, PANG Xiongqi, GUO Qiulin, et al. Assessment of oil-gas resources based on genetic method: Whole petroleum system theory and new generation basin modeling technology [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(9): 1399-1416.
- [12] 胡宗全, 郑伦举, 申宝剑, 等. 非常规与常规统一的含油气系统之初探[J]. 地质论评, 2021, 67(4): 1007-1020.
HU Zongquan, ZHENG Lunju, SHEN Baojian, et al. Preliminary study on unconventional and conventional oil-bearing gas systems

- [J]. *Geological Review*, 2021, 67(4): 1007–1020.
- [13] 宋振响, 周卓明, 江兴歌, 等. 常规-非常规油气资源一体化评价方法——基于全油气系统理论和TSM盆地模拟技术[J]. *石油学报*, 2023, 44(9): 1487–1499.
- SONG Zhenxiang, ZHOU Zhuoming, JIANG Xingge, et al. Integrated assessment method of conventional and unconventional oil-gas resources: Based on whole petroleum system theory and TSM basin modeling technology [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(9): 1487–1499.
- [14] 宋岩, 贾承造, 姜林, 等. 全油气系统内涵与研究思路[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(6): 1199–1210, 1226.
- SONG Yan, JIA Chengzao, JIANG Lin, et al. Connotation and research strategy of the whole petroleum system [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(6): 1199–1210, 1226.
- [15] 畅厚鹏, 徐建永, 徐耀辉, 等. 基于热压生排烃模拟实验的不同类型湖相烃源岩生排烃特征[J]. *天然气地球科学*, 2024, 35(12): 2240–2252.
- CHANG Houpeng, XU Jianyong, XU Yaohui, et al. Characteristics of hydrocarbon generation and expulsion in different types of lacustrine source rocks based on thermo-compression simulation experiments [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2024, 35(12): 2240–2252.
- [16] 王飞宇, 冯伟平, 庞雄奇, 等. 全油气系统生、排烃和运聚定量分析中的关键问题与解决途径[J]. *石油学报*, 2023, 44(9): 1434–1444.
- WANG Feiyu, FENG Weiping, PANG Xiongqi, et al. Key problems and solutions in quantitative analysis of hydrocarbon generation, expulsion, migration and accumulation in whole petroleum system [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(9): 1434–1444.
- [17] 马中良, 郑伦举, 李志明. 烃源岩有限空间温压共控生排烃模拟实验研究[J]. *沉积学报*, 2012, 30(5): 955–963.
- MA Zhongliang, ZHENG Lunju, LI Zhiming. The thermocompression simulation experiment of source rock hydrocarbon generation and expulsion in formation porosity [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(5): 955–963.
- [18] 郭旭升, 胡宗全, 申宝剑, 等. 中国页岩油气源-储耦合类型划分及勘探意义[J]. *石油学报*, 2024, 45(11): 1565–1578.
- GUO Xusheng, HU Zongquan, SHEN Baojian, et al. Classification and exploration significance of source-reservoir coupling types of shale oil and gas in China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(11): 1565–1578.
- [19] 胡宗全, 杜伟, 刘忠宝, 等. 页岩气源储耦合机理及其应用[M]. 北京: 地质出版社, 2018.
- HU Zongquan, DU Wei, LIU Zhongbao, et al. Source reservoir coupling mechanism of shale gas and its application [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2018.
- [20] WANG Guanping, JIN Zhijun, ZHANG Qian, et al. Effects of clay minerals and organic matter on pore evolution of the early mature lacustrine shale in the Ordos Basin, China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2023, 246: 105516.
- [21] 郭旭升, 李宇平, 腾格尔, 等. 四川盆地五峰组—龙马溪组深水陆棚相页岩生储机理探讨[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(1): 193–201.
- GUO Xusheng, LI Yuping, TENG Geer, et al. Hydrocarbon generation and storage mechanisms of deep-water shelf shales of Ordovician Wufeng Formation-Silurian Longmaxi Formation in Sichuan Basin, China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(1): 193–201.
- [22] 张宇, 赵培荣, 刘士林, 等. 中国石化“十四五”主要勘探进展与发展战略[J]. *中国石油勘探*, 2024, 29(1): 14–31.
- ZHANG Yu, ZHAO Peirong, LIU Shilin, et al. Main exploration progress and development strategy of Sinopec during the 14th Five-Year Plan period [J]. *China Petroleum Exploration*, 2024, 29(1): 14–31.
- [23] 郭旭升, 张宇, 刘超英, 等. 中国石化“十四五”油气勘探理论技术进展、挑战与发展方向[J]. *中国石油勘探*, 2025, 30(1): 1–15.
- GUO Xusheng, ZHANG Yu, LIU Chaoying, et al. Theoretical and technological progress, challenges, and development directions of petroleum exploration of Sinopec during the 14th Five-Year Plan period [J]. *China Petroleum Exploration*, 2025, 30(1): 1–15.
- [24] 王永诗, 高阳, 李军亮, 等. 渤海湾盆地济阳坳陷古近系碎屑岩致密油勘探新领域及资源潜力[J]. *石油学报*, 2025, 46(1): 118–136.
- WANG Yongshi, GAO Yang, LI Junliang, et al. New exploration fields and resource potential of Paleogene clastic tight oil in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2025, 46(1): 118–136.
- [25] 倪良田, 杜玉山, 蒋龙, 等. 渤海湾盆地济阳坳陷陆相断陷湖盆中-低成熟度页岩“富烃-成储-富集-高产”的理论认识与开发实践[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(5): 1417–1430.
- NI Liangtian, DU Yushan, JIANG Long, et al. Medium-to-low maturity shales in the faulted lacustrine basin in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin: Theoretical understanding of their hydrocarbon generation, reservoir formation, and shale oil enrichment and high-yield nature and exploitation practices [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(5): 1417–1430.
- [26] 张宇, 赵培荣, 高山林, 等. 中国石化页岩油气高质量勘探实践与启示[J]. *中国石油勘探*, 2025, 30(1): 16–27.
- ZHANG Yu, ZHAO Peirong, GAO Shanlin, et al. Practice and enlightenment of high-quality shale oil and gas exploration of Sinopec [J]. *China Petroleum Exploration*, 2025, 30(1): 16–27.
- [27] 曹自成, 张丽娟, 李登华, 等. 塔里木盆地碳酸盐岩油气资源评价关键参数研究与勘探潜力方向[J]. *深地能源科技*, 2025, 1(2): 1–16.
- CAO Zicheng, ZHANG Lijuan, LI Denghua, et al. Study on key

- parameters for carbonate oil and gas resources assessment and exploration orientations in Tarim Basin [J]. *Deep Earth Energy Science & Technology*, 2025, 1(2): 1-16.
- [28] 何贵松, 孙斌, 高玉巧, 等. 川东南地区二叠系茅口组一段非常规天然气富集高产主控因素[J]. *石油勘探与开发*, 2025, 52(2): 362-373.
- HE Guisong, SUN Bin, GAO Yuqiao, et al. Main factors controlling unconventional gas enrichment and high production in the first member of Permian Maokou Formation, southeastern Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2025, 52(2): 362-373.
- [29] 文龙, 罗冰, 王小娟, 等. 四川盆地陆相致密油气勘探新领域及资源潜力[J]. *石油学报*, 2025, 46(1): 77-88.
- WEN Long, LUO Bing, WANG Xiaojuan, et al. New exploration fields and resource potential of continental tight oil and gas in Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2025, 46(1): 77-88.
- [30] 郭彤楼, 邓虎成, 赵爽, 等. 四川盆地寒武系筇竹寺组新类型页岩气形成机理与勘探突破[J]. *石油勘探与开发*, 2025, 52(1): 57-69.
- GUO Tonglou, DENG Hucheng, ZHAO Shuang, et al. Formation mechanisms and exploration breakthroughs of new type of shale gas in Cambrian Qiongzhusi Formation, Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2025, 52(1): 57-69.
- [31] 郭彤楼. 中国页岩气发展的回顾与思考——从志留系到寒武系[J]. *油气藏评价与开发*, 2025, 15(3): 339-348.
- GUO Tonglou. Review and reflection on shale gas development in China: From Silurian to Cambrian [J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2025, 15(3): 339-348.
- [32] 雍锐, 杨洪志, 吴伟, 等. 四川盆地北部二叠系大隆组页岩气富集高产主控因素及勘探潜力[J]. *石油勘探与开发*, 2025, 52(2): 253-266.
- YONG Rui, YANG Hongzhi, WU Wei, et al. Controlling factors and exploration potential of shale gas enrichment and high yield in the Permian Dalong Formation, Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2025, 52(2): 253-266.
- [33] 王威, 刘珠江, 魏富彬, 等. 川东北地区二叠系大隆组页岩储层特征及其主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(5): 1355-1367.
- WANG Wei, LIU Zhujiang, WEI Fubin, et al. Characteristics and determinants of shale reservoir development in the Permian Dalong Formation, northeastern Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(5): 1355-1367.
- [34] 包汉勇, 赵帅, 王必金, 等. 川东红星地区二叠系茅口组页岩气勘探突破及富集主控因素[J]. *中国石油勘探*, 2024, 29(1): 65-75.
- BAO Hanyong, ZHAO Shuai, WANG Bijin, et al. Exploration breakthrough and main controlling factors for shale gas enrichment in the Permian Maokou Formation in Hongxing area in eastern Sichuan Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2024, 29(1): 65-75.
- [35] 何发岐, 雷涛, 齐荣, 等. 鄂尔多斯盆地大牛地气田深部煤层气勘探突破及其关键技术[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(6): 1567-1576.
- HE Faqi, LEI Tao, QI Rong, et al. Breakthroughs and key technology in deep coalbed methane exploration in the Daniudi Gas Field in the Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(6): 1567-1576.
- [36] 赵永强, 宋振响, 王斌, 等. 准噶尔盆地油气资源潜力与中国石化常规—非常规油气一体化勘探策略[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(5): 872-881.
- ZHAO Yongqiang, SONG Zhenxiang, WANG Bin, et al. Resource potential in Junggar Basin and SINOPEC's integrated exploration strategy for conventional and unconventional petroleum [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2023, 45(5): 872-881.
- [37] 王金铎, 张关龙, 庄新明, 等. 准噶尔盆地重点领域油气勘探研究进展及潜力方向[J]. *油气地质与采收率*, 2024, 31(4): 24-41.
- WANG Jinduo, ZHANG Guanlong, ZHUANG Xinming, et al. Research progress and potential directions of oil and gas exploration in key fields of Junggar Basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2024, 31(4): 24-41.
- [38] 曹剑, 张瑞杰, 支东明, 等. 碱湖烃源岩有机-无机相互作用与控烃机理[J]. *中国科学:地球科学*, 2025, 55(5): 1619-1641.
- CAO Jian, ZHANG Ruijie, ZHI Dongming, et al. Unique bimodal oil generation of alkaline-saline lacustrine source rock: Evidences, model and mechanism of organic-inorganic interactions [J]. *Science China Earth Sciences*, 2025, 55(5): 1619-1641.
- [39] 杨勇, 张世明, 吕琦, 等. 中国东部陆相断陷盆地中—低成熟度页岩油立体开发技术——以济阳坳陷古近系沙河街组为例[J]. *石油学报*, 2024, 45(4): 672-682, 697.
- YANG Yong, ZHANG Shiming, LYU Qi, et al. Stereoscopic development techniques for shale oil with low-medium maturity in continental faulted basins in eastern China: A case study of the Paleogene Shahejie Formation in Jiyang Depression [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(4): 672-682, 697.
- [40] 赵文智, 赵阳升, 李根生, 等. 陆相中低熟页岩油富集与原位转化科学问题及关键技术[J]. *中国科学基金*, 2023, 37(2): 276-284.
- ZHAO Wenzhi, ZHAO Yangsheng, LI Gensheng, et al. Scientific problems and key technologies of enrichment and in-situ transformation of mid-low mature shale oil in continental facies [J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2023, 37(2): 276-284.
- [41] 包书景, 葛明娜, 赵培荣, 等. 中国页岩气勘探开发现状、潜力与发展建议[J]. *石油与天然气地质*, 2025, 46(2): 348-364.

- BAO Shujing, GE Mingna, ZHAO Peirong, et al. Status-quo, potential, and recommendations on shale gas exploration and exploitation in China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2025, 46 (2): 348-364.
- [42] 高阳, 刘惠民. 渤海湾盆地济阳坳陷古近系全油气系统特征与成藏模式[J]. *石油勘探与开发*, 2025, 52(3): 551-562.
- GAO Yang, LIU Huimin. Geological characteristics and hydrocarbon accumulation model of the whole petroleum system in Paleogene of Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2025, 52 (3): 551-562.
- [43] 李熹微, 杨博, 姜福杰, 等. 渤海湾盆地冀中坳陷保定凹陷—饶阳凹陷全油气系统特征与成藏模式[J]. *石油学报*, 2025, 46 (6): 1108-1125.
- LI Xiwei, YANG Bo, JIANG Fujie, et al. Characteristics and accumulation model of the Whole Petroleum System in Baoding-Raoyang sags, Jizhong Depression, Bohai Bay Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2025, 46(6): 1108-1125.
- [44] 胡东风, 王良军, 黄仁春, 等. 四川盆地中国石化探区油气勘探历程与启示[J]. *新疆石油地质*, 2021, 42(3): 283-290.
- HU Dongfeng, WANG Liangjun, HUANG Renchun, et al. Petroleum exploration history and enlightenment in Sichuan Basin: A case study on Sinopec exploration areas [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2021, 42(3): 283-290.
- [45] 刘树根, 邓宾, 孙玮, 等. 四川盆地是“超级”的含油气盆地吗?[J]. *西华大学学报(自然科学版)*, 2020, 39(5): 20-35.
- LIU Shugen, DENG Bin, SUN Wei, et al. May Sichuan Basin be a super petroliferous basin? [J]. *Journal of Xihua University (Natural Science Edition)*, 2020, 39(5): 20-35.
- [46] 戴金星, 倪云燕, 秦胜飞, 等. 四川盆地超深层天然气地球化学特征[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(4): 588-597.
- DAI Jinxing, NI Yunyan, QIN Shengfei, et al. Geochemical characteristics of ultra-deep natural gas in the Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45 (4): 588-597.
- [47] 郭旭升, 黄仁春, 张殿伟, 等. 四川盆地海相碳酸盐岩全油气系统成藏特征与有序分布规律[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51 (4): 743-758.
- GUO Xusheng, HUANG Renchun, ZHANG Dianwei, et al. Hydrocarbon accumulation and orderly distribution of whole petroleum system in marine carbonate rocks of Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51 (4): 743-758.
- [48] 文龙, 张本健, 金值民, 等. 四川盆地陆相全油气系统成藏序列与勘探领域[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(5): 997-1007.
- WEN Long, ZHANG Benjian, JIN Zhimin, et al. Accumulation sequence and exploration domain of continental whole petroleum system in Sichuan Basin, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(5): 997-1007.
- [49] 刘显阳, 李士祥, 周新平, 等. 鄂尔多斯盆地石油勘探新领域、新类型及资源潜力[J]. *石油学报*, 2023, 44(12): 2070-2090.
- LIU Xianyang, LI Shixiang, ZHOU Xinping, et al. New fields, new types and resource potentials of petroleum exploration in Ordos Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44 (12): 2070-2090.
- [50] 张才利, 刘新社, 杨亚娟, 等. 鄂尔多斯盆地长庆油田油气勘探历程与启示[J]. *新疆石油地质*, 2021, 42(3): 253-263.
- ZHANG Caili, LIU Xinshe, YANG Yajuan, et al. Petroleum exploration history and enlightenment of Changqing Oilfield in Ordos Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2021, 42 (3): 253-263.
- [51] 姜福杰, 贾承造, 庞雄奇, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界全油气系统成藏特征与天然气富集地质模式[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(2): 250-261.
- JIANG Fujie, JIA Chengzao, PANG Xiongqi, et al. Upper Paleozoic total petroleum system and geological model of natural gas enrichment in Ordos Basin, NW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(2): 250-261.

(编辑 张玉银)