

引用本文: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.DOI:10.11781/sysydz202305832.
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 & Experiment,2023,45(5):832–843.DOI:10.11781/sysydz202305832.

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

徐旭辉¹,周卓明²,宋振响²,杨国桥²

1.中国石化 石油物探技术研究院,南京 211103;

2.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

摘要:在油气资源评价方法研究与优选的基础上,建立了针对中国石化探区“常规—非常规”以及“地质—经济—生态”2个一体化的“十三五”油气资源评价方法流程和技术体系。研究了油气资源评价关键参数,包括基于 TSM 盆地模拟技术构建了适用于我国不同类型盆地/地区烃源岩完整的生—排—滞留烃演化模式、产率模型;建立了基于典型刻度区解剖的资源评价关键参数获取方法和评价指标。通过对近 50 个盆地/地区全部含油气层系(震旦系—第四系)的系统评价,落实了中国石化矿权区常规油气、致密油气、页岩油气以及煤层气等 7 种不同类型油气的地质资源,明确了其油气资源的经济可采性和生态环境影响程度。通过资源分布特征研究,进一步明确了下一步勘探领域和方向,指出深层—超深层是常规油气的主攻方向,非常规尤其是页岩油气是未来我国油气增储上产的重要领域,海域探区也具备广阔的勘探前景。同时,资源评价结果为油公司“十四五”规划和勘探部署提供了重要依据。

关键词:TSM 盆地模拟;常规—非常规一体化;地质—经济—生态评价一体化;油气资源评价

中图分类号:TE155

文献标识码:A

DOI:10.11781/sysydz202305832

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

XU Xuhui¹, ZHOU Zhuoming², SONG Zhenxiang², YANG Guoqiao²

1. SINOPEC Geophysical Research Institute, Nanjing, Jiangsu 211103, China;

2. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China

Abstract: Based on the research and optimization of oil and gas resource assessment methods, a comprehensive oil and gas resource assessment method process and technical system, which integrated assessment of conventional and unconventional resources as well as assessment of geological, economic and ecological aspects, were established for SINOPEC-controlled exploration areas during the 13th Five-Year Plan period. The study focused on the key parameters for resource assessment, including a complete hydrocarbon generation–expulsion–retention evolution model and productivity model applicable to different types of source rocks in different basins/regions in China based on TSM basin simulation technology, and a key parameter acquisition method and assessment indicators for resource assessment based on typical calibrated unit dissection. Through systematic assessment of all oil and gas bearing layers (from Sinian system to Quaternary system) of nearly 50 basins/regions in SINOPEC-controlled exploration areas, the geological resources of seven different types of oil and gas, including conventional oil and gas, tight oil and gas, shale oil and gas, and coalbed methane were assessed, which clarified the economical recoverability and environmental

收稿日期(Received):2023-07-19;修订日期(Revised):2023-08-02;出版日期(Published):2023-09-28。

作者简介:徐旭辉(1964—),男,博士,研究员,本刊编委,从事盆地分析、油气资源评价和物探研究。E-mail:xuxh.swty@sinopec.com。

通信作者:周卓明(1970—),男,博士,高级工程师,从事油气资源评价研究。E-mail:zhouzm.syky@sinopec.com。

基金项目:“十三五”全国油气资源评价——中石化矿权区油气资源评价(2017YQZYPJ1911)资助。

© Editorial Office of Petroleum Geology & Experiment. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

impact of oil and gas resources. By studying the resource distribution characteristics, the future exploration areas and directions were further clarified. It is indicated that the deep-ultra deep layers are the main focus for conventional oil and gas exploration, while unconventional resources, especially shale oil and gas, are important areas for increasing oil and gas reserves and production in the future. The sea exploration area also has broad exploration prospects. At the same time, the results of resource assessment provide important basis for the planning and exploration deployment of oil companies during the 14th Five-Year Plan period.

Key words: TSM basin simulation; integration of conventional and unconventional resource assessment; integration of geological, economic and ecological assessment; oil and gas resource assessment

目前我国油气自给率低,对外依存度高,油气供应安全风险增大。国家历来非常重视油气资源工作,截止到“十三五”,已先后完成 5 次全国范围的油气资源评价工作,且历次资源评价成果积极推动了我国的油气勘探开发进程,并指导了一批规模发现与突破。最近一次的“新一轮全国油气资源评价(2007)”已过去十多年,在这期间随着勘探开发进展和理论技术进步,比如海相碳酸盐岩油气勘探理论、油气地质分析测试技术等发展,深化了对油气资源潜力的认识,从国家到油公司都亟需了解各类资源的分布状况,摸清家底。为此,国家组织开展了“十三五”油气资源评价工作。

针对中国石化探区(2016 年底矿权),基于十多年来取得的油气勘探新进展、地质新认识,结合实验、工程技术进步和全国“十三五”油气资源评价工作需求,开展了探区内常规、非常规油气资源评价工作^[1],取得了一系列研究进展,主要有:①建立完善了常规、非常规油气资源评价方法及参数体系,重点发展了具有自主知识产权的 TSM 盆地模拟资源评价系统等方法技术流程,并形成了 TSM 和 PertoV 等系统平台;②系统开展了不同油气资源类型典型刻度区解剖工作,获取了详实可靠的资评关键参数,为成因法和类比法应用奠定了坚实基础;③遵循国家统一组织、统一思路、统一方法、统一标准、统一进度、统一发布等“六统一”评价原则,全面系统开展了中国石化探区油气资源潜力评价;④结合效益勘探和绿色发展理念,开展油气资源经济性评价,明确待探明技术可采资源量经济性及其分布,明确生态红线对油气勘探开发和资源的影响,并开展红线外生态风险评价,为国家能源环保政策制定提出措施建议;⑤在“地质—经济—生态”三位一体化评价基础上,分析了油气资源分布特征,指出了有利勘探方向。

1 评价思路与方法

1.1 总体评价思路

在开展“十三五”油气资源评价时,主要面临

四方面的挑战:一是国家要求系统开展“全范围、全层系、全领域”的油气资源评价,中国石化需开展探区所属近 50 个盆地/地区全部含油气层系(震旦系—第四系)、7 种油气资源类型的系统评价;二是中国石化探区多位于盆地的边缘地带,且面临区块分散、面积不均、勘探程度差异大等不利因素,导致落实区带及区块资源量难度大;三是资评方法参数及软件平台不统一,尽管前期开展过多轮资源评价工作,但各盆地/地区资源评价方法及关键参数取值差异大,且采用的资源评价软件平台不一致,导致资源评价结果可比性差;四是前期资源评价主要注重地质资源量估算,对油气资源的经济性考虑不够,未开展过生态环境允许程度评价,缺乏统一的经济及生态评价方法,需要开展“地质—经济—生态”三位一体的油气资源评价。

在“十三五”全国油气资源评价总体指导思想下,按照常规与非常规并重,数量、质量、生态并举的原则,制定了具体评价流程及方案^[1]。首先根据待评价区油气成藏地质条件,落实评价单元及待评价的油气资源类型;根据待评价区勘探程度和地质资料丰富程度,分别确定适用于常规、非常规油气的资源评价方法;通过符合“勘探程度高、资源探明程度高、地质认识程度高”条件的刻度区解剖,获取成因法及类比法应用中的资源评价关键参数(运聚系数、资源丰度等)及类比法评价参数体系;采用多种(保证每个评价单元至少 2 种以上)资源评价方法,综合开展常规、非常规油气地质资源量计算。其次在地质资源量基础上开展地质可采资源量计算,并采用勘探全成本法或专家赋值法,落实不同类型油气的待探明可采资源量经济性及分布;同时开展油气资源的生态环境允许程度评价。最后在“地质—经济—生态”三位一体综合评价基础上,落实探区待探明油气资源潜力及分布特征,明确有利勘探方向(图 1)。

1.2 主要资源评价方法及系统

从评价思路可以看出,地质资源量评价仍是评价的重点,也是基础,而开展地质资源量计算最关

键的是要确定合适的评价方法及关键参数,这直接影响到资源评价结果的合理性。

目前,国内外在常规、非常规油气资源评价方面研究进展较快,也形成了各自独立的评价方法体系^[2],主要包括统计法、成因法和类比法;并采用适用于不同类型油气的资源评价方法(表 1)。常规油气资源评价中“三大类”评价方法均采用,尤其是成因法历来是我国常规油气资源评价中的主流评价方法^[3],也是本次研究的重点方法。与常规油气相比,非常规油气在形成演化过程及油气富集规律等方面存在较大差异,资源评价主要采用统计法中的体积法、(小面元)容积法以及类比法中

的 EUR 类比法和资源丰度类比法,而在常规油气资源评价中得到广泛应用的成因法则较少采用^[4-6]。

在中国石化探区,“十三五”油气资源评价包括常规油气和非常规油气两大类:常规油气包括常规油、天然气两类;非常规油气包括致密油、页岩油、致密砂岩气、页岩气和煤层气等五类。常规油气重点评价了陆上和海域 39 个盆地/地区,非常规油气评价了 30 个盆地/地区(致密油气 7 个、页岩油 5 个、页岩气 7 个、煤层气 11 个)。根据待评价盆地/地区勘探程度及地质认识,分别选取了统计法、成因法和类比法中的多种具体评价方法,开展

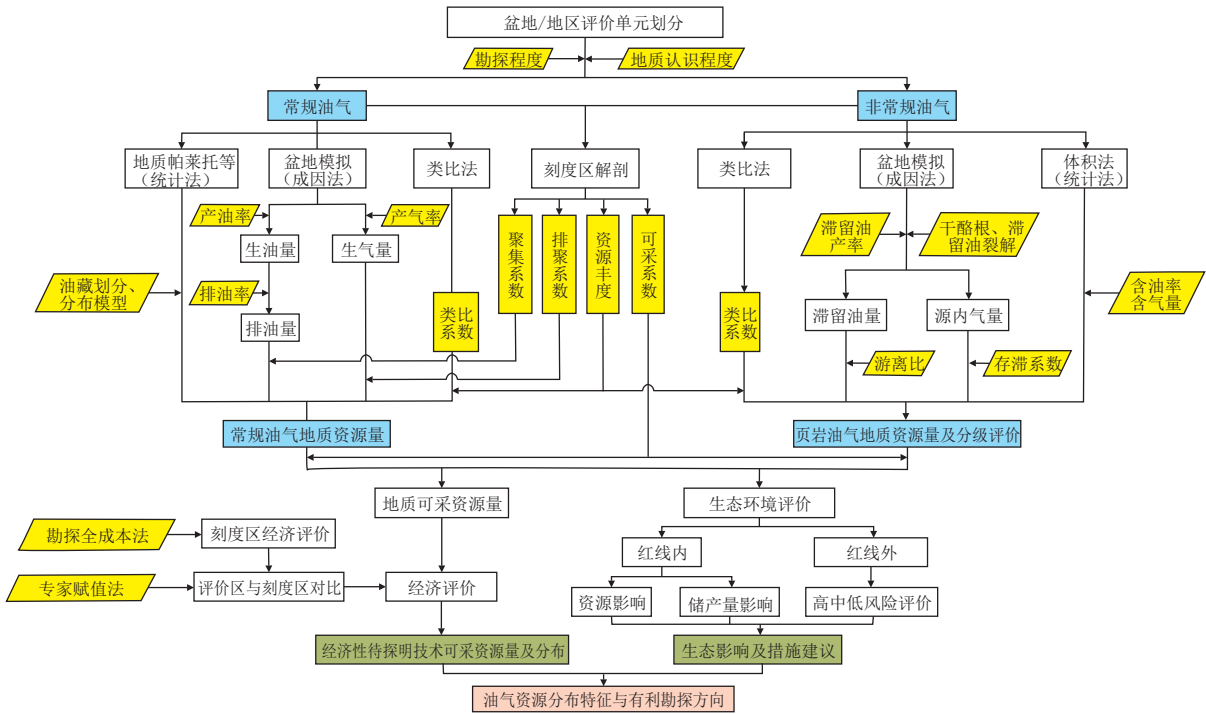


图 1 中国石化“十三五”油气资源评价技术路线

Fig.1 Resource assessment technology roadmap of SINOPEC during the 13th Five-Year plan period

表 1 全国“十三五”常规、非常规油气资源评价方法

Table 1 Conventional and unconventional oil and gas resource assessment methods during the 13th Five-Year plan period

资源类型	方法分类	方法名称	
常规油气	类比法	资源丰度类比法	
	统计法	油藏规模序列法、油气藏发现过程模型法、广义帕莱托法等	
	成因法	盆地模拟法、氯仿沥青“ A”法等	
致密油气	类比法	EUR 类比法、分级资源丰度类比法	
	统计法	小面元容积法、快速评价法	
非常规油气	类比法	EUR 类比法,资源丰度类比法等	
	页岩油气	统计法	体积法、容积法
		成因法	产烃率法
	煤层气	类比法	资源丰度类比法
	统计法	体积法、采收率法等	

注:资料据自然资源部(2017 年)。

常规油气地质资源量计算。在评价方法方面,重点开展了成因法中的 TSM 盆地模拟法^[7]和统计法中的地质帕莱托法^[8],同时加大了盆地模拟法的应用力度,对满足开展盆地模拟的盆地/地区,特别是勘探和研究程度相对较高、地质认识较清楚的盆地和地区,均使用 TSM 盆地模拟法,辅以统计法和类比法(表 2)。本文对 20 个盆地采用 TSM 盆地模拟法;对于高勘探程度区带/评价单元,主要采用统计法中的地质帕莱托法(涉及 10 个盆地/地区)和油藏规模序列法;而对于低勘探程度区带/评价单元,主要采用面积资源丰度类比法(23 个盆地/地区)。最后根据不同资源评价方法,估算资源量的可靠程度进行特尔斐加权,得到最终的地质资源量评价结果。

在非常规油气资源评价中,除采用传统的体积法、类比法和动态法外,还尝试建立了基于 TSM 盆地模拟的非常规油气资源评价方法,并在部分盆地/地区开展了典型应用。从非常规油气资源评价方法应用情况(表 3)来看,致密油气主要采用统计法中的分级容积法、曲面积分法和类比法中的分级资源丰度类比法开展地质资源量估算,对四川盆地和鄂尔多斯盆地重点探区还采用了 TSM 盆地模拟法开展评价;页岩油主要采用成因法中的热解“S₁”法、氯仿沥青“A”法和类比法开展评价,对江汉、松辽和苏北盆地重点探区尝试采用了 TSM 盆地模拟法开展评价;页岩气资源评价主要采用统计法中的含气量法、体积法和分级资源丰度类比、

EUR 类比法等开展评价,对松辽、四川盆地和中扬子等重点探区还采用了 TSM 盆地模拟法开展评价。同样对不同资源评价方法估算的资源量进行加权平均后得到最终的地质资源量。

中国石化 TSM 盆地模拟及资源评价研究团队一直致力于油气资源评价技术方法研究和软件平台研发,并在此轮评价中采用了 TSM 盆地模拟资源评价系统(V2.0 版),实现了动态、定量模拟盆地地质作用和油气响应过程,构建了“常规—非常规”一体化资源评价系统,落实了重点盆地/地区的常规—非常规油气地质资源潜力及其分布特征。

1.3 重点资评方法进展及参数研究

本轮油气资源评价中广泛采用了成因法、统计法和类比法,各资评方法均取得了一定的进展,尤其取得了成因法资源评价关键参数及刻度区解剖方面的研究进展。

1.3.1 成因法资源评价关键参数

近年来,随着非常规油气勘探的突破和“进源勘探”^[9]“常规—非常规油气有序聚集”^[4]“全油气系统”^[10]等油气地质新理论的提出,油气勘探从之前的常规为主到目前的常规、非常规并重。尽管常规、非常规油气在分布特征、源储组合、运移方式、聚集机理、渗流特征等方面存在显著差异^[4],但从成因看,常规、非常规油气具有同源性,只是由于成烃演化过程的差异和后期赋存在不同的储集层系中^[1]。本次资评中,在基于 TSM 盆地模拟的常规—非常规油气资源一体化评价技术中,有效利用

表 2 中国石化探区“十三五”常规油气资源评价方法应用情况
Table 2 Application status of conventional oil and gas resource assessment methods in SINOPEC-controlled exploration areas during the 13th Five-Year Plan period

资评方法 大类	具体资评方法	关键参数	应用的盆地/地区
成因法	TSM 盆地模拟法	盆地原型序列、“三史”模拟参数、生排烃产率、运聚系数等	北部湾、渤海湾、柴达木、东海陆架、江汉、南华北、南襄、琼东南、四川及周缘、松辽、塔里木、吐哈、焉耆、银额、中扬子、准噶尔、鄂尔多斯、二连、南黄海、苏北
	有机碳质量平衡法	有机质丰度及恢复系数、类型、生排烃产率、运聚系数等	巴马、百色、保山、博乐、敦煌、景谷、六盘山、陆良、南方外围、四川及周缘、吐哈、伊犁、曲靖、二连、阜阳、南黄海、思茅
	氯仿沥青“A”法	氯仿沥青“A”含量、排烃系数、运聚系数等	北部湾、江汉、南华北、三江、下扬子、伊犁、弋阳
	产烃率法/ 化学动力学法	频率因子、活化能、地层温度等、生油气产率、运聚系数等	渤海湾、鲁西南、南华北、松辽、塔里木、突泉、下扬子、银额、鄂尔多斯
统计法	地质帕莱托法	油气藏规模序列(最大、最小)、发现年份、油气藏分布模型等	百色、渤海湾、东海陆架、江汉、南襄、松辽、塔里木、鄂尔多斯、二连、苏北
	油藏规模序列法		百色、渤海湾、东海陆架、江汉、四川及周缘、二连、苏北
类比法	面积丰度类比法	评价面积、资源丰度、类比系数等	百色、保山、北部湾、渤海湾、柴达木、东海陆架、江汉、景谷、陆良、南方外围、琼东南、三江、四川及周缘、松辽、塔里木、突泉、银额、中扬子、准噶尔、曲靖、鄂尔多斯、南黄海、苏北
	专家法	多组评价结果、权重赋值	四川、苏北

表 3 中国石化探区“十三五”非常规油气资源评价方法应用情况

Table 3 Application status of unconventional oil and gas resource assessment methods in SINOPEC-controlled exploration areas during the 13th Five-Year Plan period

油气类型	资评方法大类	具体资评方法	关键参数	应用的盆地/地区
致密油气	成因法	TSM 盆地模拟法	盆地原型序列、“三史”模拟参数、生排烃产率、运聚系数等	四川、鄂尔多斯
	统计法	体积法	面积、厚度、油/气密度、含油/气饱和度等	鄂尔多斯、南方外围、中扬子
		曲面积分法		四川及周缘
		分级容积法	面积、厚度、油/气密度、含油/气饱和度等、分级标准	四川及周缘
	类比法	分级资源丰度类比法	面积、分级资源丰度、类比系数	四川及周缘、南方外围
		面积丰度类比法	面积、资源丰度、类比系数	四川、鄂尔多斯、沁水、银额、中扬子
页岩油	成因法	TSM 盆地模拟法	盆地原型序列、“三史”模拟参数、滞留油产率、游离系数等	江汉、松辽、苏北
		热解“S ₁ ”法	“S ₁ ”含量及恢复系数、吸附比例	渤海湾、鄂尔多斯、江汉、松辽、苏北
		氯仿沥青“ A ”法	沥青“ A ”含量及恢复系数、吸附比例	渤海湾、江汉、苏北
	统计法	容积法/小面元法	面积、厚度、密度、含油饱和度等	鄂尔多斯、江汉、松辽
	类比法	面积丰度类比法	面积、资源丰度、类比系数	江汉
页岩气	成因法	TSM 盆地模拟法	盆地原型序列、“三史”模拟参数、源内气产率、存滞系数等	中扬子、松辽、四川盆地
		有机质质量平衡法	有机质丰度及恢复系数、烃气产率、保存系数等	渤海湾、中扬子
	统计法	容积法/体积法	面积、厚度、密度、含气饱和度等	南方外围、南华北、四川及周缘、中扬子
		含气量法	面积、厚度、密度、含气量等	四川及周缘、松辽
	类比法	EUR 类比法	面积、单井 EUR、产率递减模型等	四川及周缘
		分级资源丰度类比法	面积、分级资源丰度、类比系数	四川及周缘
煤层气	体积法	面积丰度类比法	面积、资源丰度、类比系数	南方外围、南华北、四川及周缘、中扬子、
		体积法	面积、厚度、密度、含气量等	沁水、天山、河西走廊、滇东黔西、川南黔北、桂中、湘中、苏浙皖边界地区、浙赣边界地区、长江中下游

地层孔隙热压模拟实验技术^[11-12]。通过实验开展烃源岩生—排—滞留烃产率研究,为成因法计算常规、非常规油气地质资源量夯实基础。之前,该参数主要通过黄金管模拟实验获取,但由于黄金管实验无法增加压力因素,且为全封闭体系,难以真实反映地下状态,特别是深层—超深层烃源岩除地层温度较高外,地层压力一般也达到了高压甚至超压状态,对烃源岩生、排烃过程及产率均有较大的影响。基于烃源岩有限空间(PVT-L-t 联控)的地层孔隙热压模拟实验技术^[11],可开展在保留烃源岩原始矿物组成结构和有机质赋存状态、在与孔隙空间接近的生烃空间(V)中完全充满高压液态水(L)、同时考虑到与地质条件相近的静岩压力(常压至 200 MPa)和地层流体压力(常压至 150 MPa)(P)条件下所进行的有机质高温(最高模拟温度 600 ℃)(T)、短时间(t)热解生烃反应及可控压差的生、排、滞留烃模拟实验,模拟结果更符合实际地质条件下的生、排烃演化过程。

在本次资评实施过程中,系统整理了采自国内

外 14 个盆地/地区未熟—低熟烃源岩样品 52 个,并补充开展国内外 12 个低成熟样品的地层孔隙热压模拟实验分析,特别是我国中西部叠合盆地海相古老烃源岩热演化程度一般达到高一过成熟演化阶段,前期缺少对应类型烃源岩的生、排烃产率数据,导致资源评价结果可信度不高。本文采集了四川盆地广元地区茅一段低成熟泥灰岩样品,加拿大西加盆地海相泥页岩样品,开展了 2 个样品的地层孔隙热压生排烃模拟实验。

从模拟实验结果来看,海相不同类型烃源岩生、排、滞留烃模式基本一致,但生、排、滞留产率存在差异。四川广元泥灰岩滞留油产率随成熟度(R_o)增高呈现先升高后降低的趋势,滞留油产率在 R_o 为 1.0% 时达最高值(约 270 mg/g),之后随热演化程度逐步进入原油裂解演化阶段,导致滞留油产率降低;排出油产率在 R_o 为 1.1%~1.5% 时达到峰值(约 125 mg/g),之后由于原油发生裂解产率逐渐降低;总油产率在 R_o 约为 1.1% 时达到峰值(约 400 mg/g),烃气产率在高—过熟演化阶段达

到峰值(约 400 mg/g)(图 2a)。西加盆地海相混合型泥页岩滞留油产率在 R_o 约为 0.85% 时即达最高值(约 190 mg/g),排出油产率在 R_o 为 0.9%~1.2% 时达到峰值(约 350 mg/g),总油产率在 R_o 约为 0.95% 时达到峰值(约 480 mg/g),烃气产率在高—过熟演化阶段达到峰值(约 400 mg/g)(图 2b)。与四川广元泥灰岩相比,西加盆地泥页岩生排油产率明显偏高,特别是排出油产率明显高于泥灰岩样品,此外,泥页岩总体具有“早生早排、生—排油期窗口相对窄”的特点。

通过对整理和补充采集到的 64 个未熟—低成熟样品进行分地区、分层系、分有机质类型、分岩性的梳理^[1],系统获取了陆相不同有机质类型和海相不同岩相类型烃源岩的生、排、滞留烃产率曲线,在此基础上形成了适合各盆地/地区实际地质情况的生—排—滞留烃产率模型,为油气资源评价提供了重要参数。

1.3.2 基于典型刻度区解剖的资源评价关键参数

刻度区解剖历来是油气资源评价中的重点工作之一,解剖内容主要围绕油气成藏条件、资源量及刻度区资源评价关键参数三项内容展开,解剖成果为成因法、类比法应用提供关键参数(如运聚系数、资源丰度等)。

刻度区通常是指油气资源评价中用于建立评价区类比标准、符合勘探程度较高、地质规律认识程度高、油气资源探明率高或资源分布清楚的地质单元。平面上可以将盆地、凹陷、油气运聚单元、区块或区带作为一个刻度区;纵向上一个刻度区可以包含一个成藏组合、一个含油气层系,也可以是多个成藏组合或含油气层系的叠合。“十三五”油气资源评价中主要根据不同油气资源类型成藏特点,优选符合“三高”特征的典型地区,针对 7 个领域 28 种类型系统建立了 78 个刻度区(或重点解剖区)。其中常规油气刻度区 55 个,包含碎屑岩领

域刻度区 40 个,碳酸盐岩型刻度区 14 个,潜山断溶+风化壳岩溶型刻度区 1 个。致密油刻度区 2 个,分别为鄂尔多斯盆地的镇径、延长区块级砂岩型。致密气刻度区 5 个,集中在四川盆地和鄂尔多斯盆地,大牛地、杭锦旗为混源充注型,四川盆地致密气主要为源内充注型。页岩气刻度区 11 个,其中海相 10 个,主要分布在四川盆地及周缘;陆相 1 个,为川北元坝侏罗系页岩气刻度区。页岩油刻度区 3 个,分别为溱潼凹陷北港阜二段,潜江凹陷新沟咀组和潜江凹陷王厂构造带。煤层气刻度区 2 个,为延川南二叠系和织金上二叠统龙潭组。

以四川盆地元坝长兴组台缘礁滩孔陵型气藏为例开展刻度区解剖。元坝气田是我国首个超深层生物礁大气田,也是目前国内规模最大、埋深最深的生物礁气田^[13]。元坝气田主要产层是长兴组台缘礁滩相白云岩储集层,为一大型的岩性圈闭,气藏具有“一礁、一滩、一圈闭、一气藏”的特点^[14]。截至 2017 年,长兴组累计探明含气面积 278.93 km²,提交探明储量 1 943.1×10⁸ m³,预测储量 329.40×10⁸ m³。研究表明,碳酸盐岩油气二次运移存在“近源运移”和“断裂—孔缝远源运移”2 种模式,碳酸盐岩油气藏近源聚集界限多为 10 km^[15],此范围内油气成藏概率较大,元坝气田构造区构造变形弱、断裂不发育,油气运聚多以上二叠统烃源岩的“近源供气”为主,确定有利储层外延 10 km 为元坝长兴组刻度区的边界。元坝长兴组天然气主要来自北部广元—旺苍地区上二叠统深水陆棚相的吴家坪组与大隆组烃源岩,储层中普遍见固体沥青,天然气主要表现为原油裂解气的特点。气藏的演化阶段分为晚三叠世—早侏罗世的古油藏形成阶段、中侏罗世—早白垩世的古油藏原油裂解阶段和晚白垩世—现今的气藏调整改造定型阶段^[16]。

元坝气田长兴组各井区气藏属于同一油气成藏体系,通过对元坝气田长兴组历年发现的探明储

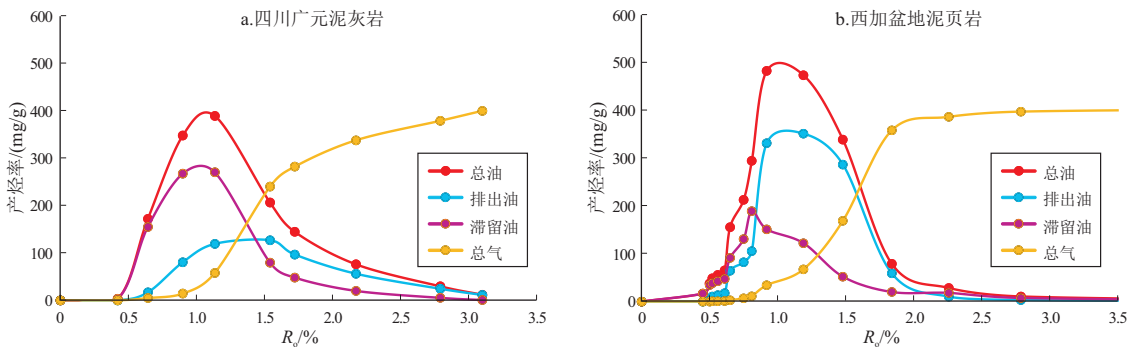


图 2 海相不同类型烃源岩完整的生—排—滞留烃演化曲线

Fig.2 Complete evolution curves of hydrocarbon generation-expulsion-retention in different types of marine source rocks

量进行统一梳理,针对 13 个油藏分别采用统计法中的地质帕莱托法和油藏规模序列法开展刻度区资源量预测,估算结果分别为 $2\,395.89\times10^8\text{ m}^3$ 和 $2\,657.27\times10^8\text{ m}^3$,特尔菲加权评价出刻度区天然气地质资源量 $2\,526.58\times10^8\text{ m}^3$;结合 TSM 盆地模拟法计算得到刻度区内上二叠统烃源岩累计生气量为 $33\,060\times10^8\text{ m}^3$,获得刻度区天然气运聚系数为 7.64%。以 10 km 作为刻度区边界,刻度区面积为 $2\,476.37\text{ km}^2$,该刻度区“区带级”资源丰度为 $1.02\times10^8\text{ m}^3/\text{km}^2$ 。

刻度区解剖除可以提供运聚系数、资源丰度等资源评价关键参数外,还可以通过刻度区成藏主控要素分析,建立类比评价参数体系,为低勘探程度区类比法应用提供重要依据。类比评价参数体系与参数赋值标准是类比法应用的前提,类比评价的主要内容是成藏条件的分析,类比参数主要考虑油气源条件、储层条件、圈闭条件、保存条件和油气成藏配置条件,各个条件下面又考虑了不同的二级要素。不同要素对油气成藏作用的贡献不同,在实际应用中要根据油气成藏条件的系统解剖,明确对油气聚集成藏起主要作用的要素,对主要要素给予更高的权重。如针对台缘礁滩型气藏,其主要受控于生物礁滩储层的分布,在类比评价参数体系中给予储层较高的权重。根据刻度区类型的不同,中石化“十三五”油气资源评价共建立了 10 余种类比参数体系,为类比法应用奠定了坚实基础。

1.4 经济与生态评价方法

本轮油气资源评价中突出了油气资源经济可采性和生态环境允许程度评价的内容,更注重评估那些真正具有经济效益,且现实可动用开发的资源。

1.4.1 油气资源经济可采性评价

在油气资源地质评价和资源量估算基础上,以已开发油气田和已申报探明储量油气田为刻度区,基于当前经济、技术水平,充分考虑探明储量区油气品质、储层物性、埋深、地理环境等地质因素,以及探明成本、视开发成本、视经营成本、弃置费和营业税金及附加费等经济性指标,采用勘探开发全成本法(已提交探明储量的高勘探程度区)和专家赋值法(中低勘探程度区)(图 1)开展 7 种类型(常规油、常规气、致密油、致密气、页岩油、页岩气、煤层气)油气资源的经济性评价,明确不同类型油气资源在 6 个关键油气价格区间(天然气价格区间: ≤ 0.50 、 $0.5\sim 1.0$ 、 $1.0\sim 1.5$ 、 $1.5\sim 2.0$ 、 $2.0\sim 2.5$ 、 $>2.50\text{ 元}/\text{m}^3$;石油价格区间: ≤ 40 、 $40\sim 50$ 、 $50\sim 65$ 、

$65\sim 80$ 、 $80\sim 100$ 、 $>100\text{ 美元}/\text{桶}$)的经济可采性,分析重点盆地不同油气资源类型的主要勘探开发成本。

为合理获取不同油气资源类型经济评价关键参数,本轮评价中系统开展了重点盆地不同油气资源类型共计 108 个经济评价刻度区的勘探开发全成本分析。刻度区的选取主要是根据不同类型油气资源评价单元的地理环境、埋深、油气品质、物性、储量丰度及勘探程度,选取已提交探明储量的区块作为刻度区。通过经济评价刻度区解剖,根据规定的财务内部收益率,建立产量、勘探投资、开发投资、经营成本、税费、所得税等经济评价参数的数据库,确定勘探开发全成本与油气藏类型、分布深度、孔隙度、渗透率等地质要素之间的关系,提供经济评价的类比参数体系。对于没有刻度区的低勘探程度区带,借用邻区或有相似性条件的区带参数进行类比取值,综合开展评价。目前,中国石化在常规油气领域已提交大量的探明储量区块,为油气资源经济评价奠定了基础,各油田分公司根据探区实际情况建立经济评价刻度区,并开展了系统评价;而在非常规(页岩油气和煤层气)领域提交探明储量相对较少,除少数区块外,主要采用类比法开展经济评价。

1.4.2 生态环境允许程度评价

“十三五”全国油气资源评价首次将生态环境允许程度评价纳入到油气资源评价工作中。生态环境允许程度评价主要内容及流程见图 3,主要是通过相关政府部门,收集国家生态保护红线资料和数据,建立生态环境保护基础数据库,根据生态红线划定情况,落实生态保护重点区域内资源潜力,确定生态保护重点区域与矿业权重叠情况,分析生态环境保护对勘探开发的影响,测算满足生态环保条件的可开发油气资源量,并分析资源潜力;对生态红线外油气资源,主要采用综合风险评价法,采用定量与定性相结合、定性为主的评价方法开展生

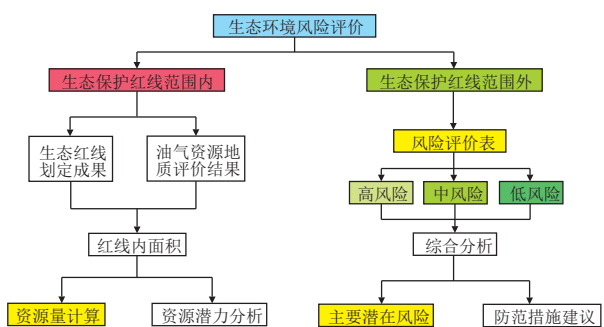


图 3 生态环境允许程度评价流程及内容
Fig.3 Assessment process and content of ecological environment permissibility

态环境风险评价,主要是针对油气资源类型、品质与地质因素,分析在勘探开发活动中可能产生的对生态环境的影响,预测可能造成生态、水、大气、土壤环境污染的风险大小,依据评价结果划分高风险区、中风险区和低风险区,识别主要潜在风险,并提出相应的防范措施与建议。

2 油气资源特征与勘探有利方向

2.1 总体资源展布特征

“十三五”油气资源评价结果显示,中国石化探区内石油地质资源量合计为 391.53×10^8 t,以常规油资源为主,地质资源量占总量的 73.4%,致密油地质资源量仅占总量的 4.9%,页岩油地质资源量占总量的 21.7%;天然气地质资源量合计为 74.35×10^{12} m³,以常规气和页岩气为主,二者所占比例基本相当,其中,常规气占总量的 42.9%,页岩气占总量的 38.6%,致密气占总量的 15.7%,煤层气占总量的 2.8%。

从分布来看,探区内地质资源量超过百亿吨油

当量的盆地有 4 个,分别为四川盆地、塔里木盆地、渤海湾盆地和东海陆架盆地,充分体现出大盆地的巨大勘探潜力;地质资源量介于 $(10 \sim 100) \times 10^8$ t 油当量的盆地/地区有 10 个,分别为鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地、四川盆地周缘、松辽盆地、江汉盆地、苏北盆地、黔南坳陷、琼东南盆地、南盘江坳陷和南华北盆地(图 4)。

2.2 深层—超深层常规油气资源分布特征及有利方向

根据我国不同地区盆地性质,东部地区埋藏 3 500~4 500 m 为深层,大于 4 500 m 为超深层;中西部地区 4 500~6 000 m 为深层,大于 6 000 m 为超深层。中国石化探区油气资源纵向深度上分布不均,东部油气资源主体分布在中层—浅层领域,深层—超深层常规油、气地质资源量分别为 21.01×10^8 t 和 0.74×10^{12} m³,分别占总量的 14.6%和 36.8%,占比相对较低(图 5a);而中西部深层—超深层常规油、气地质资源量分别为 78.21×10^8 t 和 15.7×10^{12} m³,分别占总量的 62.3%和 78.3%,资源潜力巨大,尤其是常规气主体分布在深层—超深层领域。

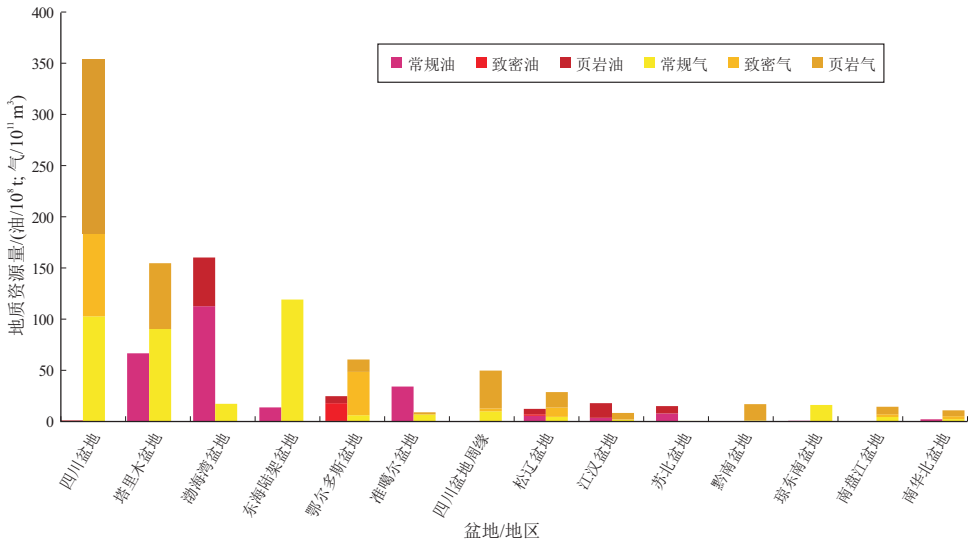


图 4 中国石化探区不同盆地资源量分布
Fig.4 Distribution of oil and gas resources in different basins in SINOPEC-controlled exploration areas

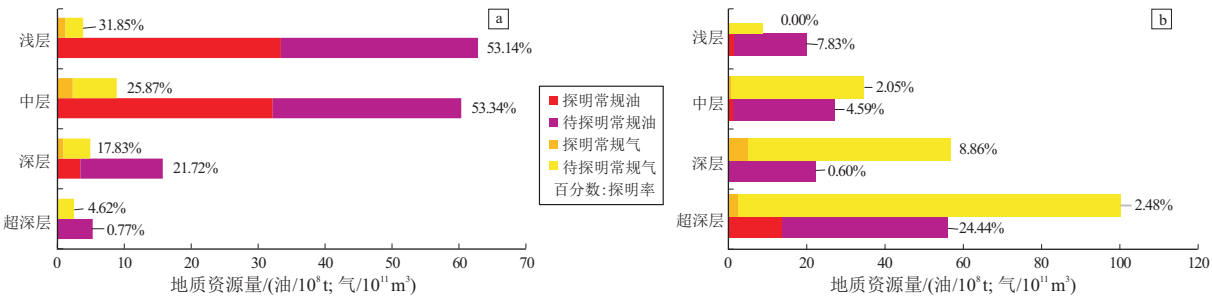


图 5 中国石化东部探区(a)和中西部探区(b)常规油气深度分布与探明情况
Fig.5 Depth distribution and approved resources rate of conventional oil and gas in the east (a) and midwest (b) exploration area of SINOPEC

从油气探明储量(截至 2018 年底,下同)及探明率来看,中西部深层常规油探明储量为 0.13×10^8 t,探明率仅为 0.60%;超深层常规油探明储量为 13.72×10^8 t,探明率为 24.44%,远低于东部地区中浅层探明率(图 5),深层—超深层常规油资源主要分布在塔里木和准噶尔盆地,尤以塔里木盆地资源潜力最大。中西部地区深层常规气探明储量为 0.50×10^{12} m³,探明率为 8.86%;超深层常规气探明储量为 0.25×10^{12} m³,探明率仅为 2.48%,远低于东部中浅层探明率(图 5),主要分布在塔里木和四川盆地。

以塔里木盆地为例(图 6),资源主体分布在深层—超深层领域,深层—超深层常规油、气地质资源量分别占总量的 92.3%和 96.7%;而深层常规油、气探明率仅分别为 1.1%和 1.36%,超深层常规油、气探明率也仅为 29.24%和 0.56%。因此,深层—超深层常规油气是塔里木盆地未来的重点勘探领域。

总体看来,中国石化陆域探区深层—超深层常规油气资源潜力大,探明率低,特别是四川及塔里木盆地等大盆地,绝大多数资源分布在深层—超深层碳酸盐岩领域,是下一步勘探的重点突破领域。

2.3 非常规领域油气资源分布特征及有利方向

中国石化探区内非常规油(致密油和页岩油)地质资源量约占石油资源总量的 26.56%,非常规气(致密气、页岩气和煤层气)地质资源量占天然气资源总量的 57.14%,尤以页岩气资源量最大,其次为致密气,探区内煤层气地质资源量也达到了 2.11×10^{12} m³。

中国石化探区致密油探明储量仅为 2.56×10^8 t(主要集中在鄂尔多斯盆地),探明率约为 13.40%;页岩油仅江汉盆地探明 319.23×10^4 t,剩余资源潜

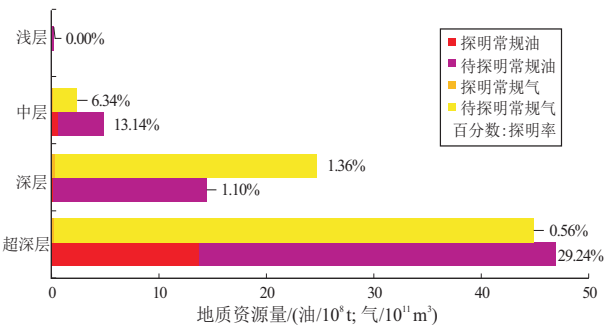


图 6 塔里木盆地中国石化探区常规油气深度分布与探明情况

Fig.6 Depth distribution and approved resources rate of conventional oil and gas in SINOPEC-controlled exploration area in Tarim Basin

力巨大;致密气探明储量为 1.21×10^{12} m³(集中在鄂尔多斯和四川盆地),探明率为 10.35%;页岩气在四川盆地探明储量为 0.73×10^{12} m³,探明率仅 2.54%;煤层气探明储量 208.03×10^8 m³(延川南),探明率仅为 0.95%(图 7)。总体来说,非常规油气探明率较常规油气更低,以四川盆地为例,非常规油气类型主要为致密气和页岩气,其中致密气地质资源量达 6.42×10^{12} m³,探明率仅为 9.16%;页岩气地质资源量为 13.61×10^{12} m³,探明率仅为 5.33%。

总体看来,中国石化及国内其他油公司在非常规油气领域的勘探总体仍处于起步阶段,油气探明程度低,剩余资源潜力巨大,是未来油气增储上产的重要领域。近两年,中国石化在页岩油气勘探发展迅速,在济阳坳陷、苏北盆地取得了陆相页岩油的重大突破;页岩气除继续扩大四川盆地五峰组—龙马溪组勘探外,也不断在深层、常压及新层系等领域取得新突破。

2.4 海域油气资源分布特征及有利方向

根据海域实际情况,本轮资评仅评价了海域探区内常规油、常规气两种类型资源,评价结果表明,常规油、气地质资源量分别为 18.02×10^8 t和 10.82×10^{12} m³,表现为油少气多,油、气分别占总量的 14%和 86%;主要分布在东海陆架盆地的西湖凹陷,占中国石化海域探区总油气资源规模的 65%,其次为东海南部地区,占 22%,琼东南盆地占 11%,其余各盆地探区内资源占比不到 3%(图 8)。从埋深看,常规油浅层、中层、深层和超深层比例大致相当,常规气以大于 3 500 m 的深层和超深层为主(图 9)。截至 2018 年底,海域探区内常规油、气探明率分别为 2.59%和 3.0%(图 8),远低于陆域东部地区常规油、气的探明率,表明海域探区具备广阔的油气勘探前景,特别是海域深层、超深层常规气领域,是下步增储上产的重要方向。

2.5 经济及生态评价

根据油气资源的经济性评价,以 65 美元/桶为

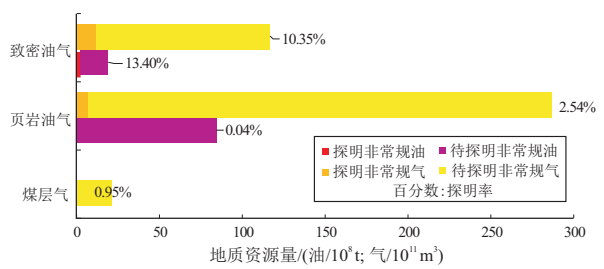


图 7 中国石化陆域探区非常规油气地质资源量构成与探明情况

Fig.7 Composition and approved resources rate of unconventional oil and gas geological resources in land exploration area of SINOPEC

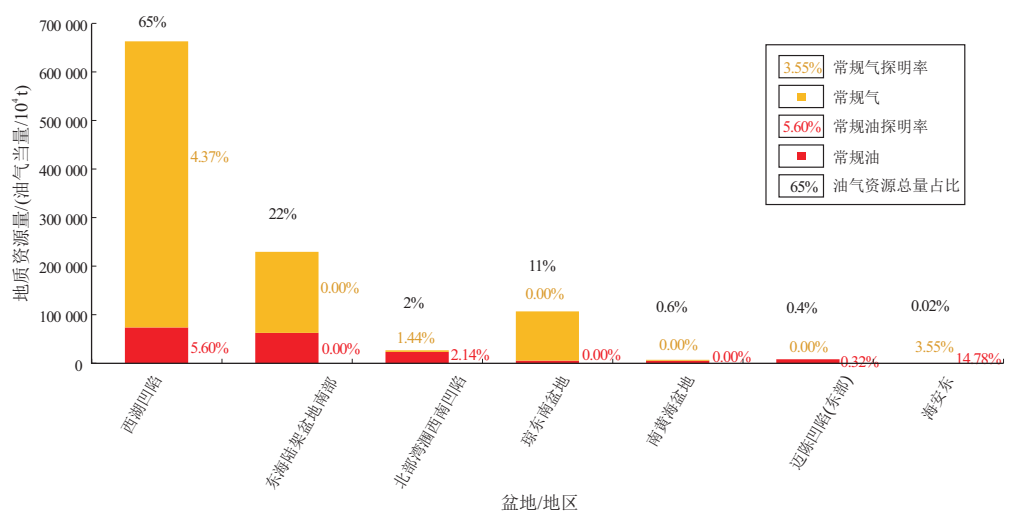


图 8 中国石化海域油气地质资源量构成与探明情况

Fig.8 Composition and approved resources rate of oil and gas geological resources in sea exploration area of SINOPEC

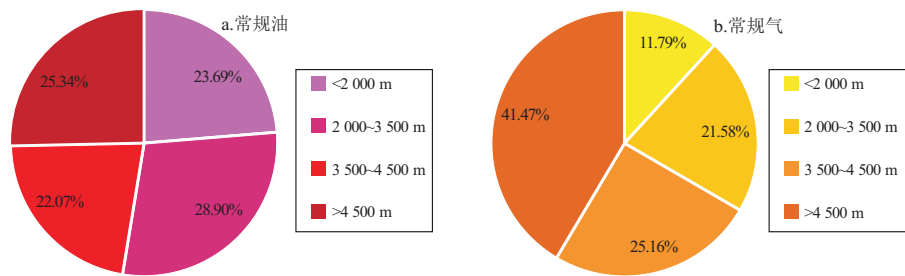


图 9 中国石化海域常规油(a)、常规气(b)深度分布

Fig.9 Depth distribution of conventional oil (a) and gas (b) in sea exploration area of SINOPEC

平衡油价,中国石化探区待探明常规油技术经济可采资源量为 22.67×10^8 t,其中深层—超深层领域为 7.53×10^8 t,占 33.2%,海域由于勘探开发成本相对较高,待探明常规油技术经济可采资源量仅为 0.72×10^8 t(图 10a);以 1.5 元/ m^3 为平衡气价,探区内待探明常规气技术经济可采资源量为 6.36×10^{12} m^3 ,其中深层—超深层领域为 2.26×10^{12} m^3 ,占 35.5%,而海域探区待探明常规气技术经济可采资源量为 2.54×10^{12} m^3 ,占 40.0%(图 10b)。

从不同油气资源类型勘探开发成本来看,在低于 65 美元/桶油价时,约 54.3%的常规油具有经济效益;35.9%的页岩油具备经济效益,主要分布在渤海湾和苏北盆地;仅 1.03%的致密油具经济效益,主要分布在四川盆地侏罗系(图 11a)。在低于 1.5 元/ m^3 气价时,约 52.0%的常规气具经济效益;78.5%的致密气具经济效益,主要分布在鄂尔多斯盆地;约 38.0%的页岩气具经济效益,主要分布在四川盆地及周缘地区;仅10.1%的煤层气具经济效

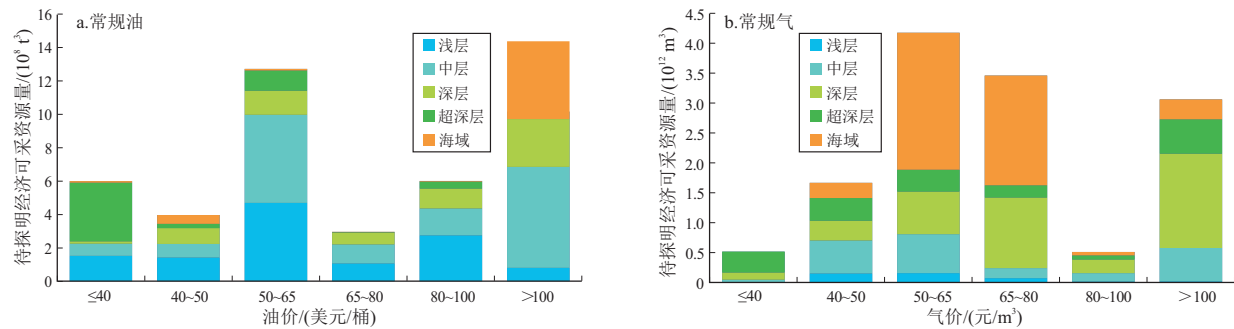


图 10 中国石化探区常规油(a)、常规气(b)在不同油价下待探明可采资源量经济性分布

Fig.10 Economic distribution of unconfirmed recoverable resources for conventional oil (a) and gas (b) in SINOPEC-controlled exploration areas at different oil prices

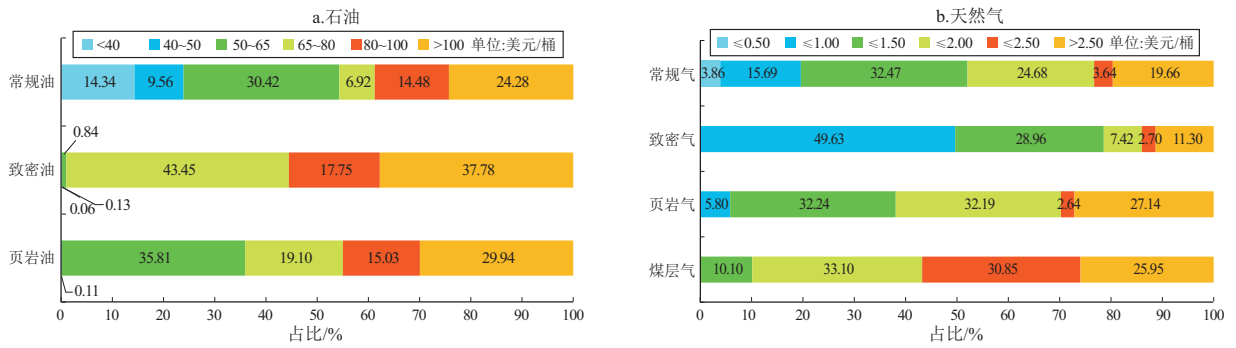


图 11 中国石化探区石油(a)、天然气(b)待探明可采资源量经济性分布比例

Fig.11 Economic distribution proportion of unconfirmed recoverable resources for oil (a) and natural gas (b) in SINOPEC-controlled exploration areas

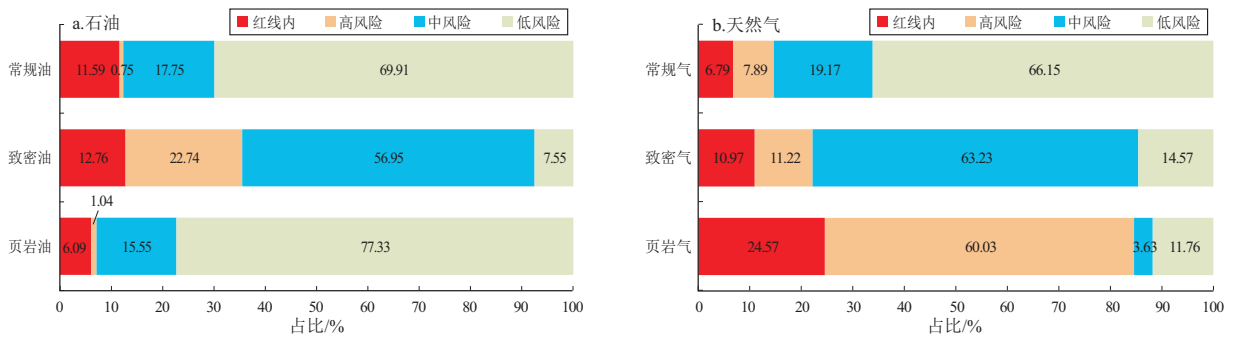


图 12 中国石化陆域探区石油(a)、天然气(b)资源量生态评价结果分布比例

Fig.12 Distribution proportion of ecological assessment resources for oil (a) and natural gas (b) in land exploration area of SINOPEC

益,主要分布在滇东黔西和川南黔北地区二叠系(图 11b)。从数据分析看,探区勘探开发成本总体较高,油气资源经济性相对较差,尤其是非常规油气资源在现今技术条件下经济动用难度仍较大,效益勘探面临巨大挑战。

根据生态环境允许程度评价,探区陆域生态红线重叠区内石油(含致密油和页岩油)地质资源量约为 41.9×10^8 t,占总量的 10.7%;重叠区外主要为中低风险资源,其中致密油存在 22.74% 左右的高风险资源,主要分布在鄂尔多斯盆地(图 12a)。生态红线重叠区内天然气地质资源量约为 7.57×10^{12} m³,占总量的 10.2%;重叠区外均存在一定比例的高风险资源,尤其是四川盆地及周缘页岩气生态风险程度总体较高(图 12b),勘探开发面临的生态环保压力较大。

3 结论与建议

(1)“十三五”油气资源评价遵循“六统一”的评价原则,建立完善了“常规—非常规”“地质—经济—生态”2 个一体化资源评价体系和平台,系统开展了典型刻度区解剖等关键参数研究;突出经济性和生态环境风险评价,提供了 5 个价格节点、

6 大区间的全成本数据以及生态红线内资源分布情况和红线外环境风险。

(2)明确了中国石化探区油气资源分布特征,提出深层—超深层常规和非常规油气领域为下一步勘探的有利方向;探区油气勘探开发成本总体较高,资源经济性相对较差,效益勘探面临挑战;而生态红线叠合区内油、气资源占比均约为 10%,叠合区外,除四川盆地及周缘页岩气生态风险程度总体较高外,总体以中低风险为主,对油气勘探有一定影响。

(3)保障能源安全,端牢能源饭碗,必须持续大力提高油气自主供应能力,随着勘探进展及油气成藏理论的丰富完善,有必要每五年开展油气资源的动态评价工作,为国家摸清资源家底,也为油公司勘探部署动态地提供指导与支撑。同时,应开展矿业权空白区油气资源潜力动态评价,持续优选有勘探潜力的出让区块,加大油气勘查开采力度。

致谢:本文是在中国石化“十三五”油气资源评价成果基础上撰写而成,资源评价工作是在中国石油化工股份有限公司油田勘探开发事业部组织下,石油勘探开发研究院牵头,十二家油田企业共同参与完成的,在此一并表示感谢。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献/Authors' Contributions

徐旭辉、周卓明参与论文研究思路设计;徐旭辉、周卓明、宋振响完成论文结构搭建;徐旭辉、周卓明、宋振响、杨国桥参与论文写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

The study was designed by XU Xuhui and ZHOU Zhuoming. The paper structure was constructed by XU Xuhui, ZHOU Zhuoming and SONG Zhenxiang. The manuscript was drafted and revised by XU Xuhui, ZHOU Zhuoming, SONG Zhenxiang and YANG Guoqiao. All the authors have read the last version of paper and consented for submission.

参考文献:

[1] 宋振响,周卓明,徐旭辉,等.“十三五”中国石化油气资源评价关键技术进展与发展方向[J].中国石油勘探,2022,27(3):27-37.
SONG Zhenxiang,ZHOU Zhuoming,XU Xuhui,et al.Progress of key technologies for oil and gas resource assessment of SINOPEC during the 13th Five-Year Plan period and development direction[J].China Petroleum Exploration,2022,27(3):27-37.

[2] 李建忠,吴晓智,郑民,等.常规与非常规油气资源评价的总体思路、方法体系与关键技术[J].天然气地球科学,2016,27(9):1557-1565.
LI Jianzhong,WU Xiaozhi,ZHENG Min,et al.General philosophy, method system and key technology of conventional and unconventional oil & gas resource assessment[J].Natural Gas Geoscience, 2016,27(9):1557-1565.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 郭秋麟,周长迁,陈宁生,等.非常规油气资源评价方法研究[J].岩性油气藏,2011,23(4):12-19.
GUO Qiulin,ZHOU Changqian,CHEN Ningsheng,et al.Evaluation methods for unconventional hydrocarbon resources[J].Lithologic Reservoirs,2011,23(4):12-19.

[6] 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.

[7] 徐旭辉.TSM 盆地模拟资源评价理论方法与应用[M].北京:石油工业出版社,2020:5-32.
XU Xuhui.Theory,methods and application of TSM basin simu-

lation and resource assessment[M].Beijing:Petroleum Industry Press,2020:5-32.

[8] 盛秀杰,金之钧,肖晖.区带勘探中的油气资源评价方法[J].石油与天然气地质,2017,38(5):983-992.
SHENG Xiujie,JIN Zhiyun,XIAO Ye,et al.Petroleum resources assessment methodology in play exploration stages[J].Oil & Gas Geology,2017,38(5):983-992.

[9] 杨智,邹才能,陈建军,等.“进(近)源找油”:油气地质理论创新与重点领域勘探思考[J].石油学报,2021,42(10):1310-1324.
YANG Zhi,ZOU Caineng,CHEN Jianjun,et al.“Exploring petroleum inside or near the source kitchen”:innovations in petroleum geology theory and reflections on hydrocarbon exploration in key fields[J].Acta Petrolei Sinica,2021,42(10):1310-1324.

[10] 贾承造.论非常规油气对经典石油天然气地质学理论的突破及意义[J].石油勘探与开发,2017,44(1):1-11.
JIA Chengzao.Breakthrough and significance of unconventional oil and gas to classical petroleum geological theory[J].Petroleum Exploration and Development,2017,44(1):1-11.

[11] 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,ZHEN 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.

[12] 徐旭辉,朱建辉,江兴歌,等.TSM 盆地模拟原理方法与应用[J].石油实验地质,2017,39(6):729-737.
XU Xuhui,ZHU Jianhui,JIANG Xingge,et al.Principle of TSM basin simulation system and its application[J].Petroleum Geology and Experiment,2017,39(6):729-737.

[13] 郭旭升,郭彤楼,黄仁春,等.中国海相油气田勘探实例之十六:四川盆地元坝大气田的发现与勘探[J].海相油气地质,2014,19(4):57-64.
GUO Xusheng,GUO Tonglou,HUANG Renchun,et al.Cases of discovery and exploration of marine fields in China(Part 16):Yuanba gas field in Sichuan Basin[J].Marine Origin Petroleum Geology,2014,19(4):57-64.

[14] 郭彤楼.元坝气田成藏条件及勘探开发关键技术[J].石油学报,2019,40(6):748-760.
GUO Tonglou.Gas accumulation conditions and key exploration & development technologies in Yuanba gas field[J].Acta Petrolei Sinica,2019,40(6):748-760.

[15] 周波,金之钧,云金表,等.碳酸盐岩油气二次运移距离与成藏[J].石油与天然气地质,2016,37(4):457-463.
ZHOU Bo,JIN Zhiyun,YUN Jinbiao,et al.Secondary oil migration distance and hydrocarbon accumulation in carbonate rocks[J].Oil & Gas Geology,2016,37(4):457-463.

[16] 郭旭升,胡东风,李宇平,等.四川盆地元坝气田发现与理论技术[J].石油勘探与开发,2018,45(1):14-26.
GUO Xusheng,HU Dongfeng,LI Yuping,et al.Discovery and theoretical and technical innovations of Yuanba gas field in Sichuan Basin,SW China[J].Petroleum Exploration and Development,2018,45(1):14-26.