

全球油气勘探机遇与挑战

窦立荣^{1,2}, 温志新¹, 王兆明¹, 贺正军¹, 宋成鹏¹, 陈瑞银¹, 刘小兵¹, 季天愚¹, 刘祚冬¹, 边海光¹, 李恒萱¹

(1. 中国石油 勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石油 国际勘探开发有限公司, 北京 100034)

摘要:全球百年油气工业发展史,是一个勘探领域持续拓展、理论研究不断深化的历程。在这一过程中,油气资源的动态评价起到了重要引领和促进作用,主要表现在理论认识突破勘探先行,资源评价与勘探实践共同促进理论技术进步,带来新领域跨越式发展。近20年,在技术进步和“双碳”背景下,全球油气勘探向“深水、深层、非常规(页岩油气)”拓展,不断开辟新领域。根据中国石油天然气集团有限公司2024年自主评价结果,全球油气总可采资源量为 $18\,684 \times 10^8$ t油当量,其中常规可采资源占61.2%,非常规技术可采资源占38.8%,常规油气资源仍是利用的主体,非常规油气资源可以成为有效的补充。未来30年,油气在一次能源消费中仍将保持重要地位,中国油公司仍需获取大量的海外勘探开发新项目来保持产量和可持续发展。围绕海外油气勘探开发高质量发展主线,结合油气地质、资源潜力与合作环境,提出未来十年常规油气应重点布局俄罗斯北极、南大西洋中段和东非海域等10大领域;页岩油应重点关注中东阿拉伯盆地、俄罗斯伏尔加-乌拉尔盆地和西西伯利亚盆地以及中西非裂谷系邦戈盆地和南乍得盆地等7大领域。随着全球能源格局深刻变革与资源开发难度加大,油气勘探正面临前所未有的复杂挑战,理论、技术、模式与智能化的深度融合,是未来勘探成功的关键路径。

关键词:深水;深层;页岩油;资源评价;地质理论;人工智能;油气勘探方向

中图分类号:TE132.1

文献标识码:A

Opportunities and challenges in global petroleum exploration

DOU Lirong^{1,2}, WEN Zhixin¹, WANG Zhaoming¹, HE Zhengjun¹, SONG Chengpeng¹, CHEN Ruiyin¹, LIU Xiaobing¹,
JI Tianyu¹, LIU Zuodong¹, BIAN Haiguang¹, LI Hengxuan¹

(1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China; 2. China National Oil and Gas Exploration and Development Company Ltd., Beijing 100034, China)

Abstract: The century-long history of the oil and gas industry in the world has witnessed rapid advancements in petroleum exploration and an ever-expanding scope of research. The dynamic evaluation of oil and gas resources has played a crucial role in guiding and facilitating this process. Specifically, theoretical breakthroughs and initial exploration help identify new potential plays, while resource evaluation and exploration practices together drive both theoretical and technological progress. These contribute to a great leap forward in new areas of petroleum exploration. Over the past two decades, driven by technological advancements and the goals of achieving carbon neutrality and peak carbon dioxide emissions, global petroleum exploration efforts have been extended into deep-water environments, deep plays, and unconventional resources dominated by shale oil and gas, continuously opening new frontiers. According to the independent evaluation of the China National Petroleum Corporation (CNPC) 2024, the technically recoverable oil and gas resources worldwide amount to 1 868.4 billion tons of oil equivalent, with conventional recoverable resources accounting for 61.2% and unconventional recoverable resources representing 38.8%. Therefore, conventional hydrocarbon resources remain the primary source of utilization, while unconventional hydrocarbon resources serve as an effective supplement. In the next 30 years, oil and gas will continue to play a vital role in global primary energy consumption. In this context, Chinese oil companies should sustain production and ensure sustainable development by securing numerous new overseas petroleum exploration and exploitation projects. Focusing on the high-quality petroleum exploration and exploitation overseas and in combination with petroleum geological conditions, resource potential, and cooperation environments, top ten major

收稿日期:2025-07-27;修回日期:2025-10-08。

第一作者简介:窦立荣(1965—),男,博士、教授级高级工程师,全球油气资源评价与海外重点领域油气勘探关键技术研究。E-mail: dliorong@petrochina.com.cn。

通信作者简介:王兆明(1975—),男,博士、高级工程师,全球油气资源评价与超前选区研究。E-mail: wangzhaoming@petrochina.com.cn。

基金项目:中国石油天然气股份有限公司重大科技专项(2023ZZ07);新型油气勘探开发国家科技重大专项(2025ZD1400800)。

regions should be given priority for conventional petroleum exploration in the next decade, such as the Russian Arctic, the Central South Atlantic, and offshore East Africa. For shale oil exploration, seven major regions should be highlighted, including the Arabian Basin in the Middle East, the Volga-Urals Basin and West Siberian Basin in Russia, and the Bongor Basin and the southern Chad Basin of the West and Central African rift system. With the profound transformation of the global energy landscape and increasing difficulties in resource development, petroleum exploration is confronted with unprecedented complex challenges. Moving forward, the deep integration of theory, technology, exploration models, and intelligence will be a critical approach to successful petroleum exploration in the future.

Key words: deep-water, deep play, shale oil, resource evaluation, geological theory, artificial intelligence (AI), petroleum exploration direction

引用格式: 窦立荣, 温志新, 王兆明, 等. 全球油气勘探机遇与挑战[J]. 石油与天然气地质, 2026, 47(2): 351–365. DOI: 10. 11743/ogg20260201.

DOU Lirong, WEN Zhixin, WANG Zhaoming, et al. Opportunities and challenges in global petroleum exploration[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(2): 351–365. DOI: 10. 11743/ogg20260201.

石油地质理论不断创新和油气资源滚动评价持续带来油气发现, 奠定了全球百年油气工业持续蓬勃发展的储量基础^[1–8]。近30年来, 中国石油实施资源和国际化战略, 开展全球油气地质研究与资源评价, 突出裂谷、前陆和被动陆缘盆地, 获取一系列重要勘探区块。聚焦区块地质特征和勘探难题, 创新地质认识和勘探评价技术, 不断取得重大发现, 有效支撑海外权益年产量超 1×10^8 t, 为分享世界油气资源、保障国家能源安全做出重要贡献^[9–13]。未来30年油气在能源消费中仍将保持重要地位, 中国油气资源的禀赋决定仍需利用“两种资源、两个市场”, 在加大中国国内勘探开发力度的同时, 需要深入开展全球油气资源评价与战略选区研究, 深化国际油气合作, 有效分享全球油气资源。

1 全球油气勘探历程与领域拓展

1859年, 于美国宾夕法尼亚州由蒸汽机驱动钻机钻成的“德雷克井”拉开了现代石油工业的序幕, 石油工业历经160多年的历史, 油气勘探蓬勃发展, 领域不断拓展。经过了地表背斜、陆上海相地层、陆相地层和浅水勘探以及非传统油气等四大发现阶段^[4]。油气地质理论从背斜圈闭到圈闭成藏理论体系, 再到含油气系统、层序地层学和干酪根生油等全要素成藏理论, 目前进入深水油气和非常规油气地质理论第4个发展阶段^[1–3, 14–27]。截至2024年底, 全球累计探明和控制(2P)可采储量中石油 $3\,961.00 \times 10^8$ t, 天然气 373.00×10^{12} m³; 2024年生产原油 45.43×10^8 t, 天然气 4.12×10^{12} m³^[28–29](图1)。

1.1 主要经历4个勘探阶段, 领域不断拓展

1.1.1 地表背斜勘探发现阶段(1859—1921年)

由于认识的局限性, 早期油气勘探主要以地表油

苗为线索, 根据地层露头判断钻探井位。西方石油公司在立足美国本土开展勘探的同时, 开始到全球发育油苗的地区进行油气勘探, 形成了除美国以外的巴库、罗马尼亚和委内瑞拉等3个新的油气生产区, 其中罗马尼亚和巴库是2个重要的原油生产区。陆上油苗区多点开花, 中美洲和中亚起引领作用, 全球发现可采储量合计 35×10^8 t油当量, 主要分布在油苗比较丰富的特提斯构造域的前陆盆地; 中美洲周边和中亚–东欧储量各占68%和15%。大油气田分布以新近系为主, 新近系、第四系和白垩系储量占比分别为79%, 7%和5%^[28]。

1.1.2 陆上海相地层大发现阶段(1922—1958年)

由于圈闭油气成藏理论以及光点二维地震、旋转钻井和模拟测井技术进步的诞生和发展, 全球油气勘探的重心转移到中东和拉美地区^[4]。已发现油气可采储量也大幅上升, 合计 $1\,366 \times 10^8$ t油当量, 陆续发现了中东地区的加瓦尔等巨型油气田, 中东、拉美和北美储量各占55%, 25%和8%^[28]。除了早期发现区持续取得勘探大发现外, 中东–北非以及前苏联迎来勘探重大突破, 94%的储量来自前陆盆地。大油气田分布以新近系、侏罗系和白垩系为主, 其储量占比分别为31%, 25%和23%^[28]。

1.1.3 陆相地层和浅水勘探大发现阶段(1959—1990年)

随着陆相石油地质理论、含油气系统、层序地层学和干酪根生油等全要素成藏理论的提出以及数字二维地震、喷射钻井和数控测井技术进步的影响, 加上油气大量需求导致的油价飙升, 石油工业蓬勃发展, 油气勘探全面开花, 中东、中亚–俄罗斯引领突破^[4]。1959年, 中国发现陆相巨型油田——大庆油田, 引领了全球陆

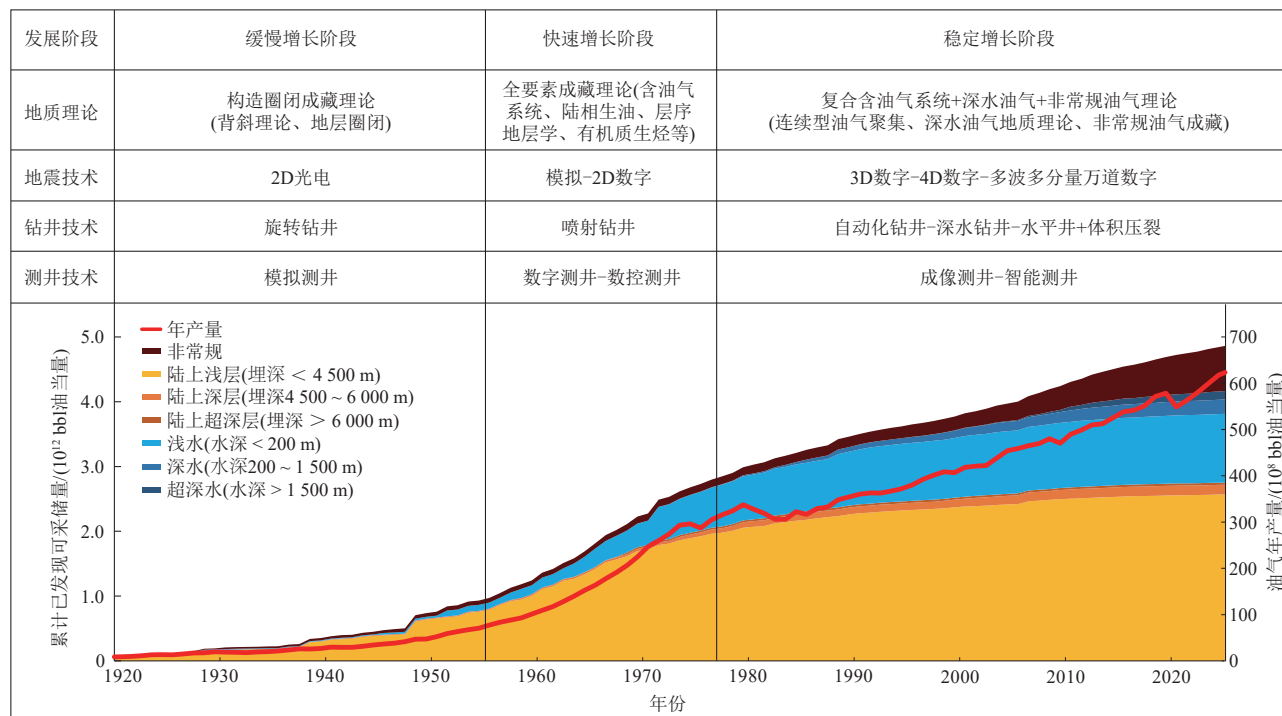


图1 全球油气储量发现领域及理论技术发展历程

Fig. 1 Distribution of recoverable oil and gas reserves and annual production from different geological regions as a result of advancements in exploration theories and technologies in the world

(1 t 油当量 = 7.2 bbl 油当量。)

相地层勘探。此阶段发现油气可采储量合计 $2\,885 \times 10^8$ t 油当量, 中东、中亚-俄罗斯和拉美各占 47%, 29% 和 6%; 传统发现区持续突破, 劳亚域的松辽、西西伯利亚和北海等裂谷盆地迎来发现高潮。大油气田分布以白垩系为主, 占 44%, 三叠系和新近系储量占比分别为 15% 和 12%^[28]。

1.1.4 非传统油气大发现阶段(1991 年至今)

非传统油气(non-conventional oil and gas)最早由 Perrodon 于 1998 年提出, 主要是指深水、深层、非常规和极地等不容易勘探开发或开采成本较高的油气资源^[30]。此阶段先后出现了连续聚集成藏理论、深水沉积体系和非常规油气理论; 地震技术由三维数字向四维数字以及多波多分量万道数字技术不断发展; 钻井进入自动化钻井时代, 深水钻井、水平井和体积压裂等技术日渐成熟; 测井发展到成像测井和智能测井阶段。受这些理论和技术进步的双重加持, 深水油气储量占比大增, 大西洋两岸一枝独秀。全球深水发现油气可采储量 233×10^8 t 油当量, 占该阶段所发现总储量的 31%, 主要位于冈瓦纳域的中-南大西洋两岸、东非海域以及特提斯域的墨西哥湾深水和东地中海等被动陆缘盆地。大油气田分布以白垩系和新近系为主, 深水储量发现中, 白垩系、

新近系和古近系储量占比分别为 55%, 26% 和 18%^[31]。

1.2 全球理论技术进步对油气重大发现起到引领和促进作用

油气工业蓬勃发展过程中, 也必然伴随着油气资源的动态评价。油气资源评价也历经了百年发展历程, 在全球范围内早期主要由石油公司主导, 后期则由政府主导。在资源评价过程中不断提出创新理念和新领域, 开启了沉积盆地—含油气系统—成藏组合—钻探目标的评价序列, 评价也由定性向定量发展。油气资源评价对理论技术进步和油气重大发现的支撑作用主要体现在: 理论认识突破勘探先行(发现苗头), 资源评价跟上(树立信心), 促进理论技术进步带来新发现(实现跨越)^[4, 32]。

在油气资源评价过程中也不断出现里程碑式的创新火花, 对理论和技术进步起到了重要的促进作用(图 2)。背斜理论之父 White 于 1920 年首次开展了资源评价^[32-33], 开创了油气资源评价的先河; 1947 年, 标准石油公司首席地质家 Weeks 开始关注并讨论全球油气勘探的最新进展^[34], 1958 年他已意识到“shale oil”的概念, 同时提出盆地分类是评价未发现油气资源的基础^[35], 并于 1965 年开始评价全球海洋油气资源^[36]。

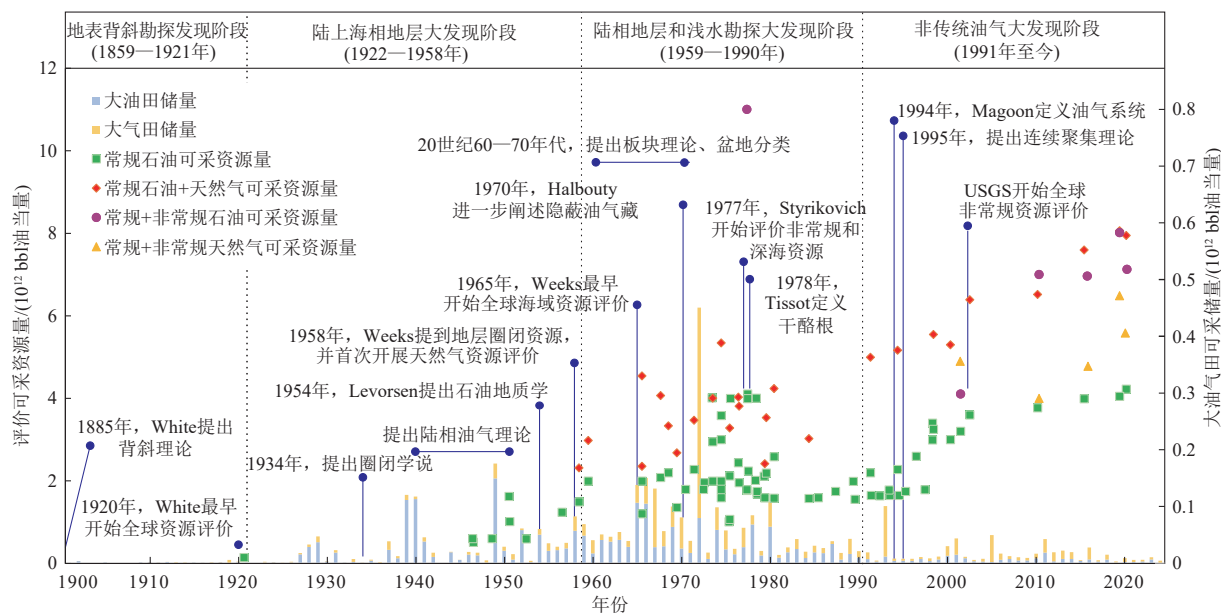


图2 全球油气资源评价历程与大油气田发现过程分布

Fig. 2 History of oil and gas resource evaluation and the discovered giant oil and gas fields worldwide

(USGS为美国地质调查局;1 t油当量 = 7.2 bbl油当量。)

Wallace 于 1952 年提出“油田在人们头脑中”的经典论述,并在 1958 年指出了美国页岩油的资源潜力。1965 年, Hendricks 提出“经济可采资源”概念,认为深层、深水 and 极地资源丰富,但当时并不具经济性^[37]。1980 年,美国开始评价其东部的页岩气和西部的致密气等。1983 年 Perrodon 提出“没有盆地就没有石油”的论断^[38],1998 年公布了全球深水、深层、非常规和极地等非传统油气资源的潜力^[30]。下面通过几个案例来阐述油气资源评价是如何对理论技术进步和重大发现起到引领和促进作用的。

1.2.1 圈闭类型由构造圈闭向隐蔽圈闭和连续型油气聚集不断拓展

最早期的油气勘探是通过地表的油苗开始的,在认识到浮力是油气运移和聚集的主要动力后,人们逐渐意识到高部位是油气聚集的有利地区,从而开启了构造找油的年代。1885 年, White 就提出了经典的“背斜油气聚集”理论^[1]。20 世纪 20—30 年代,发现了非构造油气藏,但此时的油气勘探仍以构造油藏为主;40—50 年代,中国老一辈石油地质学家开创性地提出了“陆相生油”理论,发现了大庆油田,开始了陆相地层资源评价^[39-41]。1958 年, Weeks 提到了“地层圈闭”的资源评价^[35];1965 年, Hendricks 认为更多地天然气资源存在于地层圈闭;20 世纪 50—60 年代,资源评价中已经开始考虑地层圈闭^[37]。1964 年, Levorsen 提出“隐蔽圈闭”概念^[42];20 世纪 70 年代初, Halbouty 进一步阐述了

“隐蔽油气藏”^[21];同年, Robert 主编了《地层油气藏》一书^[43];70—80 年代,隐蔽油气藏理论日臻完善,同时该类圈闭的发现实现了储量剧增。直到 21 世纪以来,以页岩油气为代表的“连续型圈闭”理论方兴未艾。新圈闭类型的认识与资源潜力评价可以认为是同频共振,不断促进了相关理论发展和石油工业进步(图 3)。

1.2.2 勘探领域由陆上到浅水再到深水—超深水跨越

里海和墨西哥湾揭开了浅水油气勘探开发的序幕。1922 年,前苏联在里海巴库油田附近用栈桥成功进行海上钻探;1936 年,美国为了开发墨西哥湾陆上油田向海的延伸部分,成功钻探了第一口海上油井,并建造了木制结构生产平台;1938 年成功开发了世界上第一个海洋油田^[44-45]。有了海洋油气勘探开发的苗头后,1958 年美国开始开展海域待发现油气资源评价,分别评价了水深 660, 1 500, 3 300, 6 000 和 8 200 ft 的油气资源潜力^[44-46];1965 年, Weeks 开始评价 1 000 ft 以内的全球海域油气资源潜力^[36];1970 年,美孚石油公司的勘探副总裁 Moody 提出盆地的范围可以延伸到水下 2 000 ft^[47];1977 年,前苏联 Styrikovich 评价全球油气资源范围包含了深海范围^[48]。

20 世纪 50—70 年代的海洋资源评价表明,深水的油气资源潜力巨大,从而增强了石油工业界进军海洋的信心,并不断进行理论创新和深水勘探开发技术的研发。例如:1962 年, Bouma 提出了“浊积岩”的概念^[49];1978 年, Walker 提出“综合水下扇”模式^[6];1996 年,

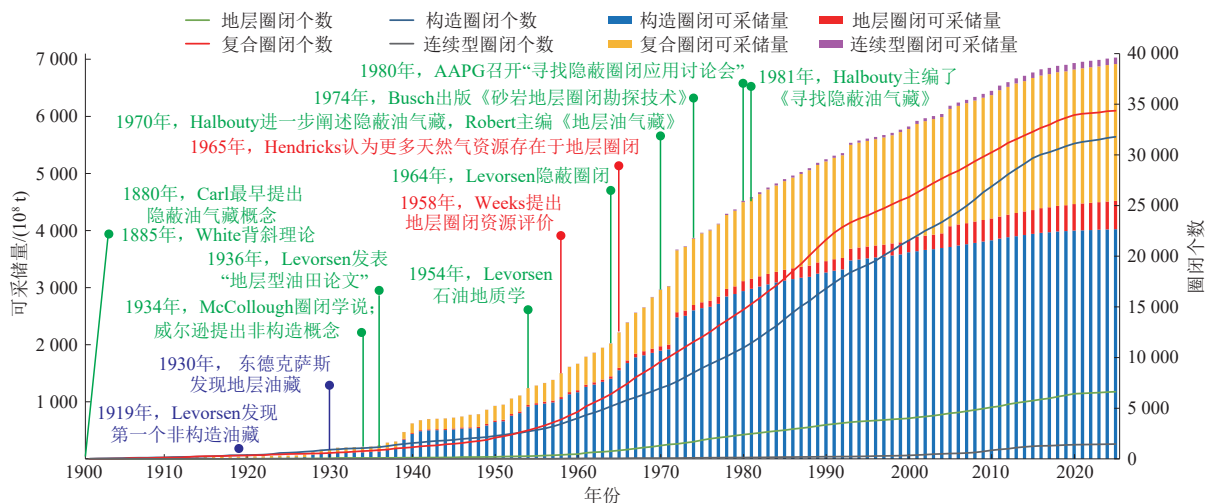


图3 全球不同圈闭类型油气藏发现过程及相关理论发展历程

Fig. 3 Discovery process of global oil and gas reservoirs of different trap types and related theoretical development history

Shanmugam 提出“碎屑流”概念^[7];1968年,美国发现第一个深水油气田;1986年,巴西发现第一个超深水油气田^[28,31,50]。直到21世纪,石油工业才真正进入深海时代,理论技术不断迭代创新,深水成为未来主战场(图4)。

1.2.3 资源类型由常规向非常规延伸,促进了“页岩革命”的发生

1914年,世界上发现了第一个页岩气田,出现了页岩

岩油气的苗头。早在1958年,Weeks等就意识到“页岩油”资源潜力大^[35];1977年,Styrlikovich采用简单类比法估算了非常规石油资源的潜力^[48];1977年,美国启动了东部页岩气先导研究项目;1980年,美国系统评价了其东部的页岩气、西部的致密气等非常规资源;1995年美国地质调查局(USGS)对非常规资源开展系统评价^[51],资源评价结果展示了页岩油气巨大的潜力,不断促进页岩油气理论和技术进步^[6,48-49,51]。1995年,Schmoker

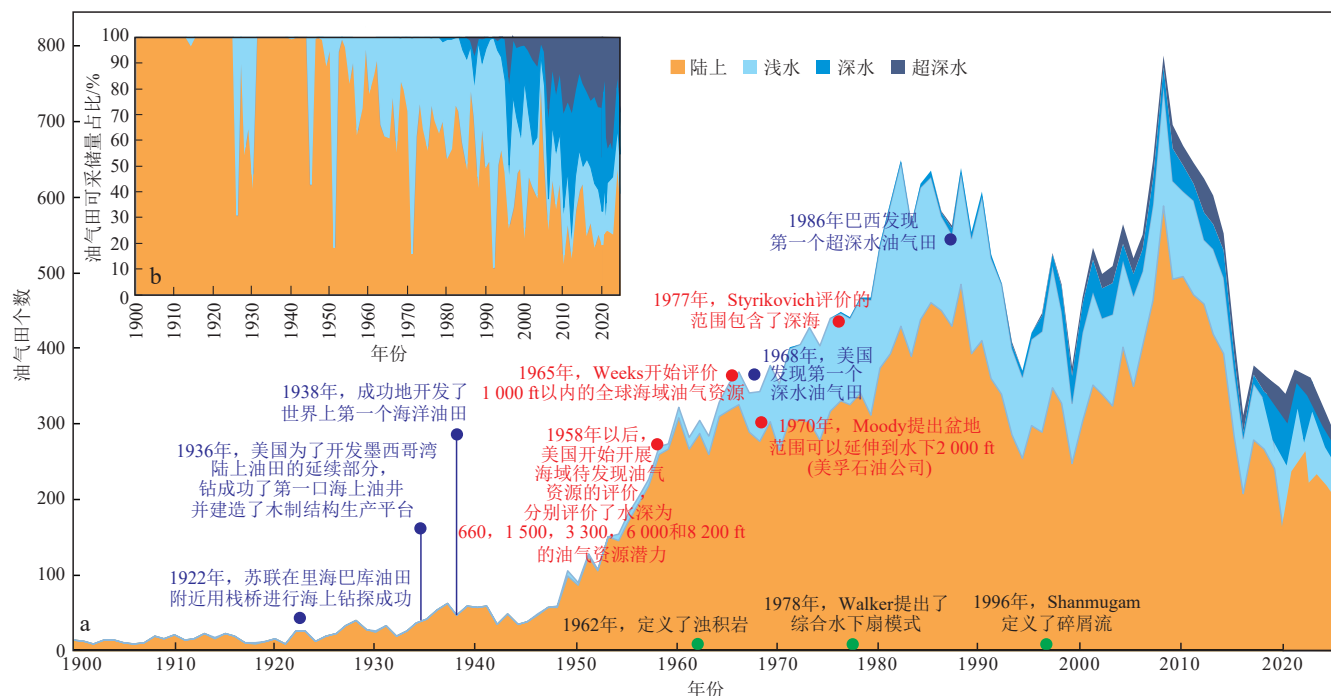


图4 全球不同水深油气发现及相关理论技术发展历程(修改自文献[4])

Fig. 4 Distribution of global onshore-offshore oil and gas fields as result of related theoretical and technological development history (modified after reference [4])

a. 油气田个数海、陆分布情况;b. 油气田可采储量海、陆分布情况

等提出的“连续型油气聚集”奠定了非常规油气理论的里程碑^[52];2012年,Cander提出利用黏度-渗透率图版界定非常规油气^[53];2014年,邹才能等提出了常规-非常规有序聚集理论^[5,54]。在非常规油气政策方面,1978年,美国颁布《天然气政策法》,取消天然气价格管制,逐步建立市场定价机制;1980年,美国颁布《能源意外获利法》,出台税收优惠和补贴政策,鼓励非常规和低渗透气藏开发。1980—2005年期间页岩油气技术攻关获得突破,1998年大型水力压裂成功,2005年水平井分段压裂成功,从此开启非常规时代^[5,55]。2006年以来,长距离水平井和分段体积压裂技术大规模应用,并不断发展,促进了北美“页岩革命”的发生,并逐渐影响世界,成为石油工业的又一个里程碑^[5,55](图5)。

1.2.4 勘探深度由中-浅层向深层-超深层进军

1917年,在美国阿纳达科盆地获第一个深层发现——Cement气田,埋深4 900 m;1947年美国阿纳达科盆地获第一个超深层发现——Elk City气田,埋深6 000 m^[28-29]。随着深层油气勘探的发现,1995年美国USGS首次提出了深层天然气资源评价方法,并评价了美国深层的天然气资源;1999年对全球主要地区埋深4 500 m以深天然气资源潜力进行了评估。深层油气资源的潜力加大了进军深层的信心,陆续在美国墨西

哥湾等地发现多个深层大型油气田。截至目前,全球陆上共发现900多个埋深大于4 500 m的油气田,主要分布在美洲、中东和亚太等地区^[28-29]。深层勘探过程中,逐渐突破传统生烃死亡线(200 ℃)、储层消亡线(埋深6 000 m)及油气成藏下限(埋深8 000 m)地质理论认识,勘探深度不断下移^[56]。

中国三大板块呈现小克拉通、多岛洋的构造格局,经历多期碰撞改造,构造-沉积分异产生垂向叠置的源-储组合,形成多勘探“黄金带”^[57],随着浅层勘探程度的不断提高,走向深层-超深层成为现实选择。超深层油气资源占剩余总资源量的33%,为中国油气勘探的重要接替领域^[57-58]。

中国深层的油气勘探虽然起步相对较晚,但发展迅速,目前中国深层-超深层理论技术整体处于国际领先地位。1966年起,中国开启深层油气勘探开发实践,历经初步探索、突破发现和规模发展3个阶段,实现了深层-超深层油气勘探开发跨越式发展。2015年,全国第三次资源评价初步评价了中国深层资源潜力;“十三五”期间,中国系统评价了埋深4 500~8 000 m的资源潜力。目前,中国已成为全球陆上埋深6 000 m以深超深层油气勘探开发的引领者,钻探深度已超过万米,贡献了全球陆上超深层90.8%的原油产量和96.9%的天然气产量,全球排名第一^[56,58]。

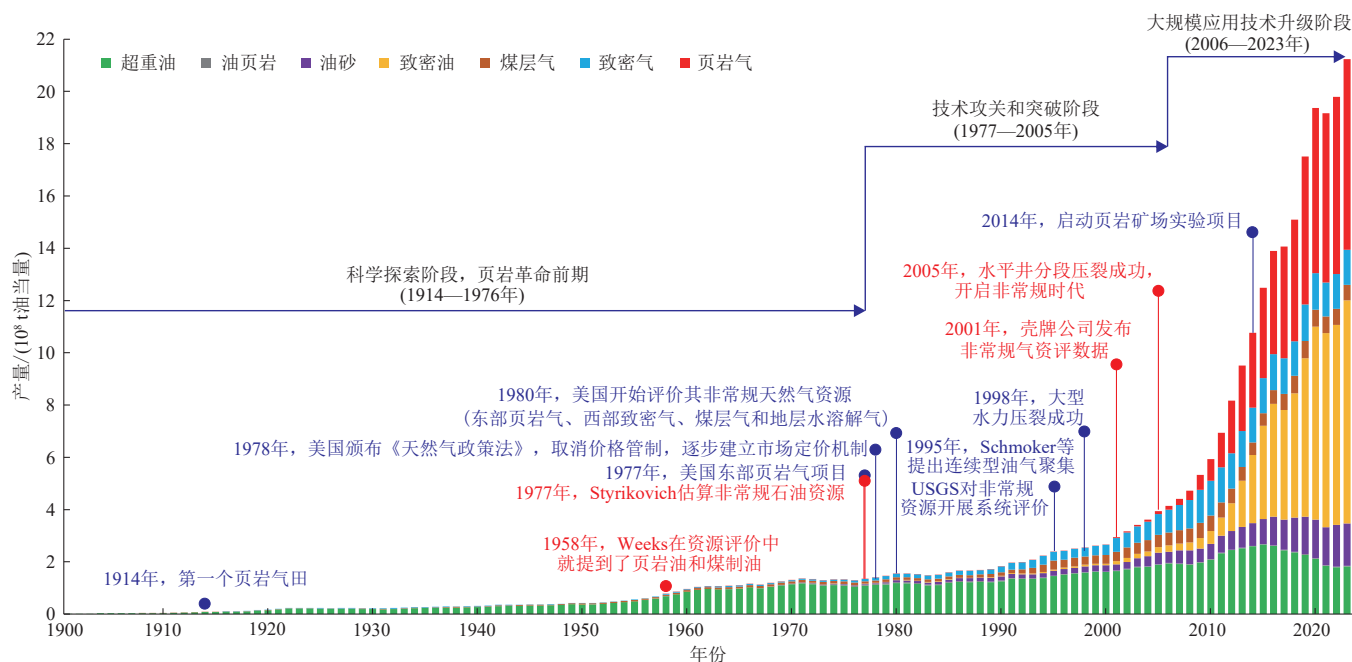


图5 全球不同类型非常规油气产量剖面及相关理论技术发展历程

Fig. 5 Production profile along with relevant theoretical and technological development history for various unconventional hydrocarbon types worldwide
(USGS为美国地质调查局。)

2 全球近20年油气勘探形势与特点

2.1 全球油气勘探新发现

2004—2024年,全球累计发现油气田23 151个,其中常规油气田9 547个,常规油气田个数占比41.2%(不含北美陆上);累计发现油气可采储量1 218.6×10⁸ t油当量,其中常规油气714.3×10⁸ t油当量,常规油气储量占比58.6%,常规油气中天然气储量占比58.0%^[28-29,56]。陆上发现常规油气田6 580个,主要位于中东中阿拉伯盆地、扎格罗斯前陆、俄罗斯西西伯利亚和中亚阿姆河盆地,可采储量301.0×10⁸ t油当量,占已发现常规油气可采储量的42.1%,陆上发现天然气较多,占陆上发现油气储量的61.8%。海域发现油气田2 966个,主要来自中-南大西洋两岸、东非海域、东地中海和墨西哥湾等地区,可采储量413.3×10⁸ t油当量,占已发现常规油气可采储量的57.9%,其中深水-超深水领域可采储量占海域的66.7%^[56](图6)。

2.2 全球油气勘探新领域

全球近20年来油气勘探新领域主要集中在“深层、深水、非常规(页岩油气)”。

2.2.1 深水-超深水已成全球风险勘探主战场

大型世界级常规油气的发现多通过海域勘探获得,深水-超深水储量近年占比高于陆上和浅水,2020—2022年深水-超深水领域占比高达73%~82%^[28]。石油巨头积极布局深水-超深水领域,并获得系列油气大发现。被动陆缘盆地是深水油气勘探的重中之重。全球现今92%的深水沉积位于被动陆缘盆地,该类盆地可代表深水领域,近20年53.8%的油气储量发现于该类盆地,近10年该类盆地发现油气占比高达70.0%^[56];2004—2024年,被动陆缘盆地新发现储量居六类盆地首位,储量占比为42.3%~68.2%(图7)。

2.2.2 深层-超深层钻井增长迅速,中国深层钻探迈进“超万米”新时代

2004—2024年,全球深层-超深层探井数量累计2 424口,累计增长约16倍,超深层探井占比22.4%。近20年,中国和美国分别引领陆上和海上超深层探井钻探,中国陆上超深层探井占全球陆上超深层探井的53.0%,美国海上超深层探井占全球海上超深层探井的77.0%^[28]。2025年1月5日,中国首口超万米科探井——深地塔科1井在地下10 910 m深度处完钻,成为亚洲第一、世界第二的垂直深度井,连续钻穿了塔里

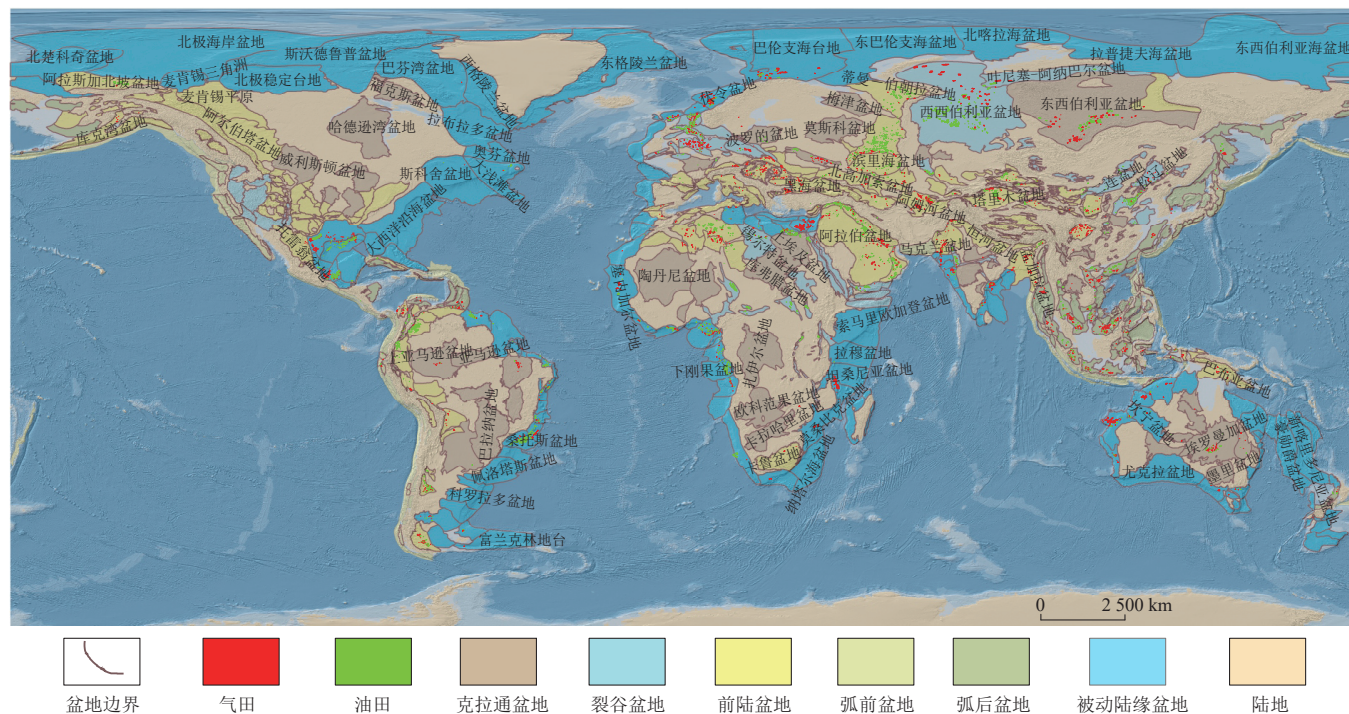


图6 2004—2024年全球常规油气发现分布(不含北美陆上,数据引自文献[28])

Fig. 6 Distribution of conventional oil and gas discoveries worldwide from 2004 to 2024 (excluding onshore North America; data from reference [28])

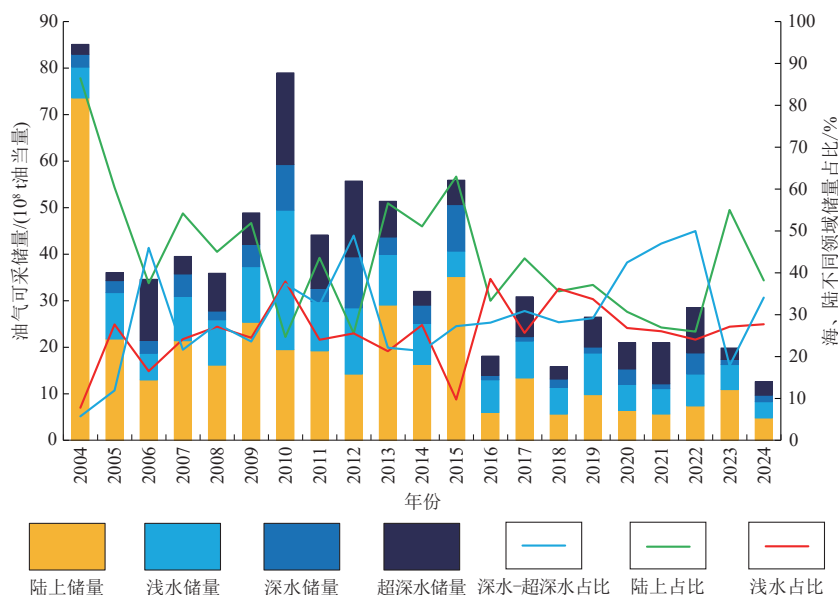


图7 2004—2024年全球海、陆领域常规油气发现可采储量分布柱状图(数据引自文献[28])

Fig. 7 Bar chart showing the distribution of offshore and onshore conventional oil and gas reserves discovered from 2004 to 2024 worldwide (data from reference [28])

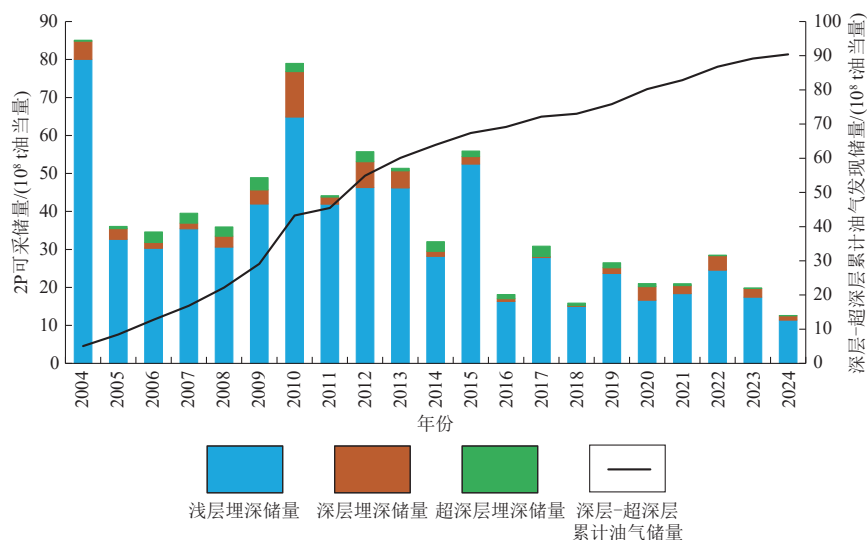


图8 2004—2024年全球不同深度常规油气发现可采储量分布柱状图(数据引自文献[28])

Fig. 8 Bar chart showing the annual and depth distribution of conventional oil and gas reserves discovered from 2004 to 2024 worldwide (data from reference [28])

木盆地12套地层,最终在万米深度发现优质烃源岩和有效储层,极大地拓展了万米深层油气勘探的新领域^[59]。

2.2.3 非常规油气走上前台,页岩油气异军突起

2004—2024年,全球累计发现非常规油气田13 604个,油气2P可采储量 504.3×10^8 t油当量,页岩气和页岩油在非常规储量发现中占比最大,分别为38.2%和36.6%^[28,56](图8)。北美地区非常规油气发现储量全球最多,占全球非常规油气发现储量的

86.4%。阿根廷页岩油气、俄罗斯页岩油、中东页岩气和致密气、亚太煤层气和致密气以及北非页岩油气资源潜力大(图9)。

3 全球油气勘探重大机遇与潜力

3.1 不同能源转型情境下油气需求仍占重要地位

据埃克森美孚和中国石油经济技术研究院预测^[60-61],在不考虑碳减排情景下,2050年全球油气需求

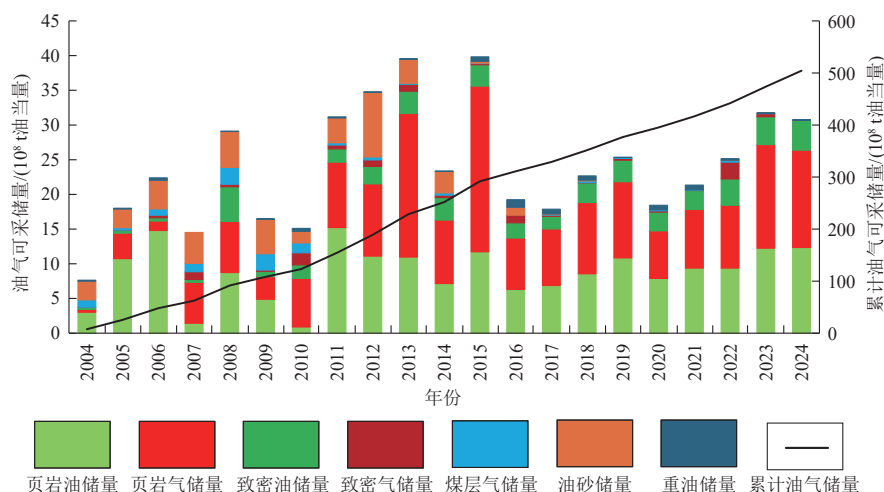


图9 2004—2024年全球不同类型非常规油气发现可采储量分布柱状图(数据引自文献[28])

Fig. 9 Bar chart showing the annual and type distribution of unconventional oil and gas reserves discovered from 2004 to 2024 worldwide (data from reference [28])

占能源总需求比例均为54%,与当前基本持平;在考虑碳排放情景下,2050年占比依然达32%~47%。2030年前后,中国境外石油和天然气权益产量将达到 2.0×10^8 t油当量;2035年海外油气产量会大幅度下降,2040年石油和天然气权益产量将分别为高峰产量的35%和54%。因此,未来10年加大跨国油气勘探开发在保障国家能源安全中仍将保持重要地位^[60-61]。

3.2 常规油气可采资源潜力仍然较大

根据中国石油勘探开发研究院2024年最新发布的评价结果^[4,62],全球常规油气可采资源总量为 $11\,434.0 \times 10^8$ t油当量,占全球油气可采资源总量的61.2%,其中石油占46.3%、凝析油占5.1%、天然气占48.6%,按总量大小依次分布于中东、俄罗斯、亚太、中南美、非洲、北美、中亚和欧洲(图10)。其中,全球剩余常规油气可采储量为 $3\,908.0 \times 10^8$ t油当量,占常规油气可采资源量的34.2%,主要分布于俄罗斯、卡塔尔、沙特阿拉伯、伊朗和伊拉克等国家,位于阿拉伯、西西伯利亚、扎格罗斯、阿姆河和尼日尔三角洲等盆地。全球已发现油气田储量增长量为 $1\,119.6 \times 10^8$ t油当量,占常规油气可采资源量的9.8%,主要分布于俄罗斯、沙特阿拉伯、卡塔尔、伊朗和美国等国家,位于阿拉伯、扎格罗斯、西西伯利亚、阿姆河和鲁伍马等盆地。全球待发现常规油气可采资源量为 $3\,799.2 \times 10^8$ t油当量,占常规油气可采资源量的33.2%,主要分布于俄罗斯、中国、巴西、美国 and 伊朗等国家,位于阿拉伯、西西伯利亚、扎格罗斯、桑托斯和阿姆河等盆地。

3.3 非常规油气技术可采资源可成为有效补充

全球非常规油气技术可采资源量为 $7\,250.0 \times 10^8$ t油当量,占全球油气可采资源总量的38.8%,其中石油占58.6%、天然气占41.4%,可成为现实的接替资源(图11)。全球非常规石油技术可采资源量为 $4\,248.5 \times 10^8$ t,其中油页岩占36%、重油占30%、页岩油占19%、油砂占15%;主要分布于美国、俄罗斯、加拿大、委内瑞拉、沙特阿拉伯和巴西等国家,位于阿尔伯达、东委内瑞拉、阿拉伯、尤因塔和西西伯利亚等盆地。全球非常规天然气技术可采资源量为 351.6×10^{12} m³,其中页岩气占67%、煤层气占15%、致密气占18%;主要分布于美国、俄罗斯、中国、加拿大、阿根廷和阿尔及利亚等国家,位于阿尔伯达、美国湾岸、阿巴拉契亚、内乌肯和阿拉伯等盆地^[4,62]。

4 全球油气勘探领域与面临挑战

4.1 近期油气勘探领域与方向

4.1.1 常规油气近期重点关注10个领域

常规油气资源仍是海外油气合作利用的主体,近期应重点关注10个领域(表1)。俄罗斯北极的西西伯利亚和拉普捷夫海等盆地,主要成藏组合是白垩系和侏罗系岩性地层圈闭;中东地区的阿拉伯和扎格罗斯盆地,主要成藏组合是白垩系、侏罗系和古生界的深层及岩性圈闭;南大西洋中段桑托斯、坎波斯和宽扎盆

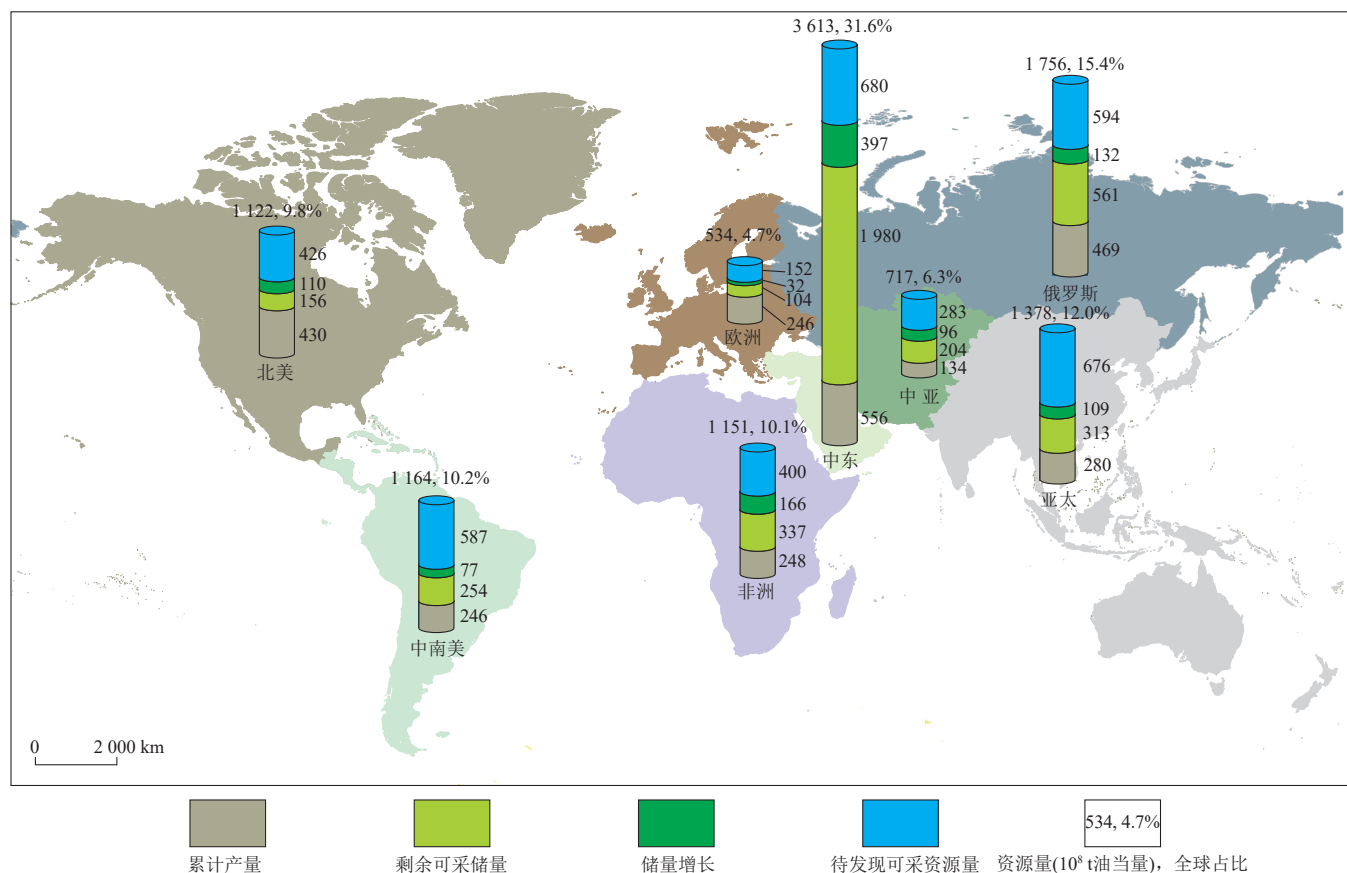


图10 全球常规油气可采资源量大区平面分布

Fig. 10 Distribution of recoverable conventional oil and gas resources in different regions worldwide

地,主要成藏组合是盐下生物灰岩和盐上重力流砂岩;索马里海域的侏罗系生物礁、白垩系-古近系斜坡扇;莫桑比克海域赞比西三角洲、安哥奇盆地,主要成藏组合是白垩系-古近系斜坡扇;阿根廷海域科罗拉多和阿根廷滨海盆地,主要成藏组合是侏罗系-白垩系裂谷、斜坡扇;西北非海域塞内加尔和塔尔法亚盆地,主要成藏组合是白垩系陆架砂岩和盆底扇;西南非海域的奥伦治盆地、南非海域盆地,主要成藏组合是上、下白垩统重力流和生物礁;圭亚那滨海及周边的圭亚那滨海和福斯杜亚马逊盆地,主要成藏组合是上白垩统斜坡扇;东非裂谷系的坦噶尼喀、马加迪和阿尔伯特等盆地,主要成藏组合是中新统砂岩等。主要的合作方式是积极参加资源国的招标,开发区块可主动议标。

4.1.2 页岩油近期重点关注7个领域

随着技术的进步,海外的页岩油也可以成为必要的补充,根据自主评价的技术可采资源量和合作环境,近期应重点关注7个领域(表2)。中东阿拉伯盆地的鲁卜哈利和美索不达米亚次盆,主要成藏组合包括侏罗系、白垩系和志留系热页岩;俄罗斯西西伯利亚盆地

上侏罗统巴热诺夫组,蒂曼-伯朝拉和伏尔加-乌拉尔盆地泥盆系多玛尼克组;北非克拉通古达米斯盆地的志留系热页岩和泥盆系、北非裂谷希尔特盆地的白垩系;中西非裂谷系邦戈尔和南乍得盆地白垩系;南美安第斯前陆内务肯盆地的侏罗系和白垩系。

4.2 全球油气勘探面临的挑战

随着全球能源格局深刻变革与资源开发难度加大,油气勘探正面临前所未有的复杂挑战,亟需理论突破、技术革新与发展模式转型。

复杂领域驱动相关油气地质理论持续深化,特别是在深层、深水及非常规等领域。全油气系统理论需进一步深化并推广应用^[63-64]。深层-超深层领域高温、高压环境下烃源岩生-排烃机理、储层孔隙演化规律和流体相态行为等均有特殊性。碳酸盐岩缝洞型和火山岩等复杂储层成藏机制需更精准刻画^[65-67]。深水重力流沉积体系(如海底扇)的精细沉积构型与储层非均质性表征、盐下构造变形与油气运聚路径预测、天然气水合物成藏系统稳定性等理论亟需突破。纳米级孔喉系统中烃类赋存状态与流动机制、地层压力演化与裂

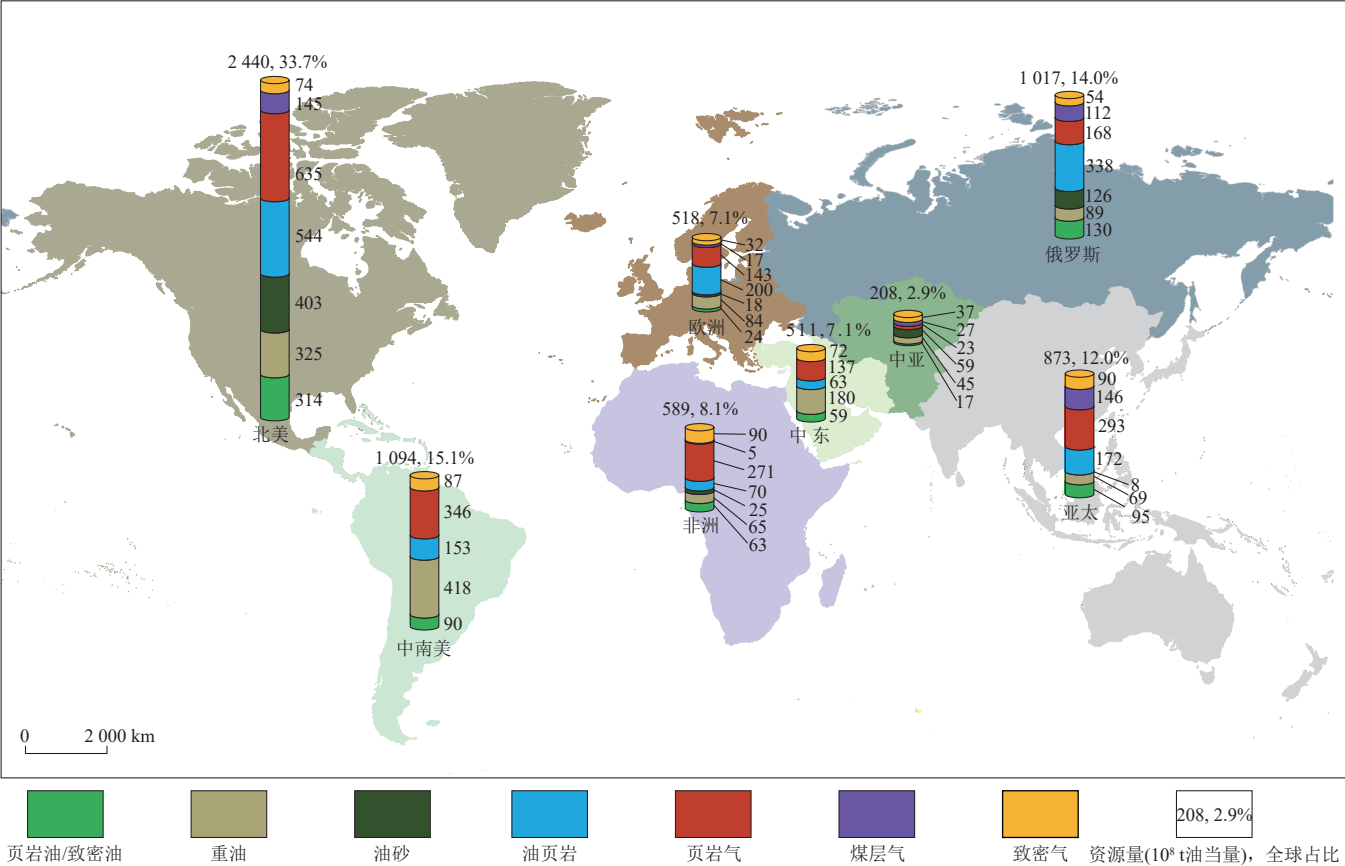


图 11 全球非常规油气技术可采资源量大区平面分布

Fig. 11 Distribution of technically recoverable unconventional oil and gas resources in different regions worldwide

表 1 常规油气近期关注的 10 个领域基本情况

Table 1 General information on 10 regions for conventional oil and gas exploration to be prioritized in the near term					
序号	领域	盆地群	主要成藏组合	常规待发现可采资源量/(10 ⁸ t油当量)	合作机会
1	俄罗斯北极	西西伯利亚盆地、拉普捷夫海盆地等	白垩系和侏罗系岩性地层	391	参股+开放区块
2	阿拉伯前陆	阿拉伯盆地、扎格罗斯盆地	白垩系、侏罗系和古生界的深层及岩性圈闭	653	招标+参股
3	南大西洋中段	桑托斯盆地、坎波斯盆地、宽扎盆地	盐下生物灰岩、盐上重力流砂岩	362	巴西 OPP 招标
4	索马里海域	索马里滨海盆地	侏罗系生物礁、白垩系-古近系斜坡扇	41	招标+议标
5	莫桑比克海域	赞比西三角洲盆地、安哥奇盆地	白垩系-古近系斜坡扇	32	招标+参股
6	阿根廷海域	科罗拉多盆地、阿根廷滨海盆地	侏罗系-白垩系裂谷、斜坡扇	27	第二/三轮招标
7	西北非海域	塞内加尔盆地、塔尔法亚盆地	白垩系陆架砂岩、盆底扇	24	参股+开放区块
8	西南非海域	奥伦治盆地、南非海域盆地	上白垩统和下白垩统重力流、生物礁	42	参股+招标
9	圭亚那滨海	圭亚那滨海盆地、福斯杜亚马逊盆地	上白垩统斜坡扇	15	公司参股
10	东非裂谷系	坦噶尼喀盆地、马加迪盆地、阿尔伯特盆地等	中新统砂岩	12	参股+开放区块

缝网络有效性评价、“甜点区”形成的多因素耦合控制理论等仍需完善。

勘探核心技术迭代升级成为降本增效关键,地质目标的复杂化对勘探技术提出更高要求。地震勘探技术需发展超高精度成像技术以清晰刻画深部小断层、复杂盐下构造及薄储层;研发宽频、宽方位、高密度采

表2 页岩油近期关注的7大领域基本情况

Table 2 General information on seven major regions for shale oil exploration to be highlighted in the near term

序号	领域	主要盆地	有利成藏组合	页岩油技术可采资源量/(10 ⁸ t)	合作机会
1	中东阿拉伯前陆	阿拉伯盆地(鲁卜哈利和美索不达米亚次盆)	侏罗系、白垩系和志留系热页岩	42.7	招标+参股
2	俄罗斯裂谷	西西伯利亚盆地	上侏罗统巴热诺夫组	93.2	参股+议标
3	俄罗斯前陆	蒂曼-伯朝拉盆地、伏尔加-乌拉尔盆地	泥盆系多玛尼克组	37(18.2,18.8)	参股+议标
4	北非克拉通	古达马斯盆地	志留系热页岩和泥盆系	17.3	议标
5	北非裂谷	希尔特盆地	白垩系	25.6	议标
6	中西非裂谷系	邦戈尔盆地、南乍得盆地	白垩系	7.9	先导试验
7	南美安第斯前陆	内务肯盆地	侏罗系和白垩系	27.8	参股+议标

集装备与处理技术,提升信号分辨率与保真度;加强多波多分量地震应用,更精准识别流体与裂缝。发展适应复杂储层的新一代成像测井、随钻远探测及地层测试技术;强化测井-地震-地质多学科联合反演与人工智能解释^[68-69],实现储层参数与流体性质的精细、定量和实时评价。

低碳与经济性成为未来油气勘探决策的双重约束,在能源转型与市场竞争压力下,勘探开发模式发生根本转变。低碳化刚性约束要求勘探过程减排,降低勘探活动自身碳足迹。勘探重点向天然气(特别是液化天然气LNG)及伴生高价值凝析油等低碳资产倾斜,同时需要关注具备碳捕集、利用与封存(CCUS)潜力的盆地和圈闭^[70]。聚焦“价值勘探”,从追求规模转向追求效益,全生命周期成本管控。风险投资组合优化,平衡高风险前沿领域与低风险成熟区域的投入,提高整体投资回报率和抗油价波动能力。未来成功的勘探项目,必然是在严格碳约束条件下具备强劲经济竞争力的项目。

人工智能(AI)赋能油气勘探全流程智能化跃升。AI正深刻重塑勘探 workflow,特别是在智能地震解释与储层预测方面,利用深度学习实现地震层位/断层自动追踪、盐丘/河道等地质体智能识别,效率提升数十倍^[65]。应用机器学习算法融合地震、测井和地质等多源数据,进行储层参数高精度预测和“甜点区”三维空间智能定位。实现勘探目标智能评价与决策;开发AI驱动的勘探潜力快速评价平台,综合地质风险、资源规模、经济性和碳强度等多维度因素,对勘探目标进行智能排序与优选。利用强化学习和数字孪生技术模拟不同勘探策略下的长期收益,辅助管理层进行最优投资决策。

5 结论

1) 油气资源的动态评价伴随着油气工业的蓬勃

发展。在资源评价过程中不断提出创新理念和勘探新领域,开启了沉积盆地—含油气系统—成藏组合—勘探目标的评价序列,由定性向定量发展。资源评价对理论技术起到重要促进作用,首先是理论认识突破勘探先行发现新的苗头,资源评价跟上树立信心,进而促进油气地质理论进步和勘探开发新技术的研发,最终不断实现新领域跨越式发展。

2) 近20年,在技术进步和“双碳”背景下,全球油气勘探向“深水、深层、非常规(页岩油气)”拓展,不断开辟新领域。根据中国石油2024年自主评价结果,全球常规油气可采资源总量为11 434 × 10⁸ t油当量,占全球油气可采资源总量的61.2%,其中石油占46.3%、凝析油占5.1%、天然气占48.6%;全球非常规油气技术可采资源量为7 250 × 10⁸ t油当量,占全球油气技术可采资源总量的38.8%,其中石油占58.6%、天然气占41.4%。常规油气资源仍是利用的主体,非常规油气可以成为有效的补充。

3) 根据多家权威机构预测,未来30年油气在能源消费中仍将保持重要地位。中国油公司应积极抓住未来10年窗口期,围绕海外油气勘探开发高质量发展主线,加大海外油气资源利用力度。结合油气地质、资源潜力与合作环境,近期常规油气应重点布局俄罗斯北极、南大西洋中段和东非海域等10大领域;页岩油应重点关注中东阿拉伯盆地、俄罗斯伏尔加-乌拉尔盆地和西西伯利亚盆地以及中西非裂谷系邦戈尔盆地和南乍得盆地等7大领域。

4) 全球油气勘探已步入以“复杂、低碳、高效、智能”为特征的新时代。唯有持续深化地质认识,突破核心技术,将低碳经济性融入勘探基因,并充分利用AI等颠覆性技术实现全流程智能化升级,方能在严峻挑战中识别并高效开发具有长期价值的油气资源,在能源转型浪潮中把握发展主动权。理论、技术、模式与智能化的深度融合,是未来勘探成功的关键路径。

参 考 文 献

- [1] WHITE I C. The geology of natural gas [J]. Science, 1885, 5 (125): 521-522.
- [2] MCCOLLOUGH E H. Structural influence on the accumulation of petroleum in California [M]//WRATHER W E, LAHEE F H. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1934: 735-760.
- [3] DICKINSON W R. Plate tectonic evolution of sedimentary basins [M]//DICKINSON W R, YARBOROUGH H. Plate Tectonics and Hydrocarbon Accumulation. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1978: 1-56.
- [4] 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.
- [5] 邹才能, 陶士振, 侯连华, 等. 非常规油气地质 [M]. 北京: 地质出版社, 2011.
- ZOU Caineng, TAO Shizhen, HOU Lianhua, et al. Unconventional petroleum geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011.
- [6] WALKER R G. Deep-water sandstone facies and ancient submarine fans: Models for exploration for stratigraphic traps [J]. AAPG Bulletin, 1978, 62(6): 932-966.
- [7] SHANMUGAM G. High-density turbidity currents; are they sandy debris flows? [J]. Journal of Sedimentary Research, 1996, 66 (1): 2-10.
- [8] HUBBERT M K. Nuclear energy and the fossil fuels [C]//Spring Meeting of the Southern District. Washington, D. C.: American Petroleum Institute, 1956: 7-25.
- [9] 窦立荣, 汪望泉, 肖伟, 等. 中国石油跨国油气勘探开发进展及建议 [J]. 石油科技论坛, 2020, 39(2): 21-30.
- DOU Lirong, WANG Wangquan, XIAO Wei, et al. Progress and suggestions on CNPC's multinational oil and gas exploration and development [J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2020, 39(2): 21-30.
- [10] 刘合年, 史卜庆, 薛良清, 等. 中国石油海外“十三五”油气勘探重大成果与前景展望 [J]. 中国石油勘探, 2020, 25(4): 1-10.
- LIU Henian, SHI Buqing, XUE Liangqing, et al. Major achievements of CNPC overseas oil and gas exploration during the 13th Five-Year Plan and its prospects [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(4): 1-10.
- [11] 窦立荣, 袁圣强, 刘小兵. 中国油公司海外油气勘探进展和发展对策 [J]. 中国石油勘探, 2022, 27(2): 1-10.
- DOU Lirong, YUAN Shengqiang, LIU Xiaobing. Progress and development countermeasures of overseas oil and gas exploration of Chinese oil corporations [J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(2): 1-10.
- [12] 薛良清, 史卜庆, 王林, 等. 中国石油西非陆上高效勘探实践 [J]. 中国石油勘探, 2014, 19(1): 65-74.
- XUE Liangqing, SHI Buqing, WANG Lin, et al. Achievements of CNPC's high-efficiency exploration of offshore blocks in west Africa [J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(1): 65-74.
- [13] 何文渊, 李志, 汪望泉, 等. 中国石油海外油气勘探30年成效与经验 [J]. 石油科技论坛, 2025, 44(1): 1-8.
- HE Wenyuan, LI Zhi, WANG Wangquan, et al. Achievements and experience of CNPC overseas oil and gas exploration in past 30 years [J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2025, 44 (1): 1-8.
- [14] KUENEN P H, MIGLIORINI C I. Turbidity currents as a cause of graded bedding [J]. The Journal of Geology, 1950, 58 (2): 91-127.
- [15] LEVORSEN A I. Geology of petroleum [M]. San Francisco: W. H. Freeman and Company, 1954.
- [16] TUZO WILSON J. Hypothesis of earth's behaviour [J]. Nature, 1963, 198(4884): 925-929.
- [17] MCKENZIE D P. Speculations on the consequences and causes of plate motions [J]. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 1969, 18(1): 1-32.
- [18] DICKINSON W R. Plate tectonics and sedimentation [M]//DICKINSON W R. Tectonics and Sedimentation. Tulsa: SEPM Society for Sedimentary Geology, 1974: 1-27.
- [19] KLEMM H D. Petroleum basins-classifications and characteristics [J]. Journal of Petroleum Geology, 1980, 3(2): 187-207.
- [20] BALLY A W. Basins and subsidence—A summary [M]//BALLY A E, BENDER P L, MCGETCHIN T R, et al. Dynamics of Plate Interiors. Washington, D. C.: American Geophysical Union, 1980: 5-20.
- [21] HALBOUTY M T, MEYERHOFF A A, KING R E, et al. World's giant oil and gas fields, geologic factors affecting their formation, and basin classification: Part I: Giant oil and gas fields [M]//HALBOUTY M T. Geology of Giant Petroleum Fields. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1970: 502-528.
- [22] TISSOT B P, WELTE D H. Petroleum formation and occurrence [M]. Berlin: Springer, 1978.
- [23] VAIL P R, MITCHUM R M, Jr, TODD R G, et al. Seismic stratigraphy and global changes of sea level [M]//PAYTON C E. Seismic Stratigraphy—Applications to Hydrocarbon Exploration. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1977: 49-212.
- [24] CROSS T A, LESSENGER M A. Sediment volume partitioning: Rationale for stratigraphic model evaluation and high-resolution stratigraphic correlation [M]//GRADSTEIN F M, SANDVIK K O, MILTON N J. Sequence Stratigraphy—Concepts and Applications. Amsterdam: Elsevier Science, 1998: 171-195.
- [25] 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.
- [26] 贾承造, 姜林, 赵文. 全油气系统中的致密油气: 成藏机理、富集规律与资源前景 [J]. 石油学报, 2025, 46(1): 1-16, 47.

- JIA Chengzao, JIANG Lin, ZHAO Wen. Tight oil and gas in Whole Petroleum System: Accumulation mechanism, enrichment regularity, and resource prospect[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2025, 46(1): 1-16, 47.
- [27] 李国欣, 张斌, 张君峰, 等. 中国深层煤岩气勘探开发重大基础科学问题与研究方向[J]. *石油学报*, 2025, 46(6): 1025-1036.
- LI Guoxin, ZHANG Bin, ZHANG Junfeng, et al. Major basic scientific issues and research directions for exploration and development of deep coal-rock gas in China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2025, 46(6): 1025-1036.
- [28] S&P Global. IHS energy: EDIN[EB/OL]. (2025-01-01)[2025-06-30]. <https://ihsmarkit.com/index.html>.
- [29] Rystad Energy. Ecube[DB/OL]. [2025-01-01]. <https://www.rystadenergy.com/>.
- [30] PERRODON A. The world's non-conventional oil and gas resources [J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 1998, 16 (2/3): 279-281.
- [31] 温志新, 王建君, 王兆明, 等. 世界深水油气勘探形势分析与思考[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(5): 924-936.
- WEN Zhixin, WANG Jianjun, WANG Zhaoming, et al. Analysis of the world deepwater oil and gas exploration situation [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(5): 924-936.
- [32] 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.
- [33] WHITE D. The petroleum resources of the world[J]. *The Annals of the American Academy of Political and Social Science*, 1920, 89: 111-134.
- [34] WEEKS L G. Highlights on 1947 developments in foreign petroleum fields[J]. *AAPG Bulletin*, 1948, 32(6): 1093-1160.
- [35] WEEKS L G. Fuel reserves of the future: Geological notes [J]. *AAPG Bulletin*, 1958, 42(2): 431-438.
- [36] WEEKS L G. World offshore petroleum resources [J]. *AAPG Bulletin*, 1965, 49(10): 1680-1693.
- [37] Thomas Andrews Hendricks. Resources of oil, gas, and natural-gas liquids in the United States and the world: Circular 522[R]. Reston: U. S. Geological Survey, 1965.
- [38] PERRODON A. Dynamics of oil and gas accumulations [M]. Pau, France: Elf Aquitaine, 1983.
- [39] 王小军, 李敬生, 李军辉, 等. 大庆油田油气勘探进展及方向[J]. *大庆石油地质与开发*, 2024, 43, 223(3): 26-37.
- WANG Xiaojun, LI Jingsheng, LI Junhui, et al. Oil and gas exploration progress and direction of Daqing Oilfield [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2024, 43, 223(3): 26-37.
- [40] 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. Evaluation method system and application of oil and gas resources [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2016.
- [41] 郑民, 李建忠, 吴晓智, 等. 我国主要含油气盆地油气资源潜力及未来重点勘探领域[J]. *地球科学*, 2019, 44(3): 833-847.
- ZHENG Min, LI Jianzhong, WU Xiaozhi, et al. Potential of oil and natural gas resources of main hydrocarbon-bearing basins and key exploration fields in China[J]. *Earth Science*, 2019, 44(3): 833-847.
- [42] LEVORSEN A I. The obscure and subtle trap [J]. *AAPG Bulletin*, 1966, 50(10): 2058-2067.
- [43] KING R E. Stratigraphic oil and gas fields—classification, exploration methods, and case histories [M]. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1972.
- [44] 万广峰. 巴西深水油气勘探开发实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 2020.
- WAN Guangfeng. Oil and gas exploration and development practice in deepwater Brazil [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2020.
- [45] 赖斯. 油气评价方法与应用[M]. 翟光明, 等译. 北京: 石油工业出版社, 1992.
- RICE D D. Oil and gas assessment 'methods and applications' [M]. ZHAI Guangming, et al, translated. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992.
- [46] 胡文海, 张绍海, 于秀琳. 油气资源评价方法译文集(2)[M]. 北京: 中国石油天然气总公司情报研究所, 1992.
- HU Wenhai, ZHANG Shaohai, YU Xiulin. Translation set of oil and gas resource evaluation methods (2) [M]. Beijing: Intelligence Research Institute of China National Petroleum Corporation, 1992.
- [47] MOODY J D. Petroleum demand of future decades [J]. *AAPG Bulletin*, 1970, 54: 2239-2245.
- [48] STYRIKOVICH M A. The long-range energy perspective [J]. *Natural Resources Forum*, 1977, 1(3): 251-261.
- [49] BOUMA A H. Sedimentology of some flysch deposits: A graphic approach to facies interpretation [M]. Amsterdam: Elsevier, 1962: 88-123.
- [50] ANJOS Sylvia M C, SOMBRA Cristiano L, SPADINI Adali R. 巴西油气勘探开发历程: 从陆上到超深水[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(4): 796-806.
- ANJOS Sylvia M C, SOMBRA Cristiano L, SPADINI Adali R. Petroleum exploration and production in Brazil: From onshore to ultra-deepwaters [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(4): 796-806.
- [51] 傅成玉. 非常规油气资源勘探开发[M]. 北京: 中国石化出版社, 2015.
- FU Chengyu. Exploration and development for unconventional hydrocarbons[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2015.
- [52] SCHMOKER J W. Method for assessing continuous-type (unconventional) hydrocarbon accumulations [M/CD]//GAUTIER D L, DOLTON G L, TAKAHASHI K I, et al. National Assessment of United States Oil and Gas Resources—Results, Methodology,

- and Supporting Data. Tulsa: USGS, 1995.
- [53] CAUDER H. What is unconventional resources? [R]. Long Beach, California: AAPG Annual Convention and Exhibition, 2012.
- [54] 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.
- [55] 王纪伟, 宋丽阳, 康玉柱, 等. 中美典型常压页岩气开发对比与启示[J]. 特种油气藏, 2024, 31(4): 1-9.
WANG Jiwei, SONG Liyang, KANG Yuzhu, et al. Comparison and Implications of Typical Normal Pressure Shale Gas Development between China and the United States [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2024, 31(4): 1-9.
- [56] 中国石油勘探开发研究院(RIPED). 全球油气勘探开发形势及油公司动态(2025年)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2025.
Research Institute of Petroleum Exploration and Development. Global petroleum E&D trends and company dynamics [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2025.
- [57] 窦立荣, 温志新, 王兆明, 等. 全球古老油气成藏组合资源潜力、重大发现及启示[J]. 石油学报, 2024, 45(8): 1163-1173.
DOU Lirong, WEN Zhixin, WANG Zhaoming, et al. Resource potential, giant discoveries, and implications of ancient hydrocarbon plays worldwide[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(8): 1163-1173.
- [58] 何登发, 李德生, 童晓光, 等. 中国沉积盆地油气立体综合勘探论[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(2): 265-284.
HE Dengfa, LI Desheng, TONG Xiaoguang, et al. Integrated 3D hydrocarbon exploration in sedimentary basins of China[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(2): 265-284.
- [59] 王春生, 冯少波, 张志, 等. 深地塔科1井钻井设计关键技术[J]. 石油勘探技术, 2024, 52(2): 78-86.
WANG Chunsheng, FENG Shaobo, ZHANG Zhi, et al. Key technologies for drilling design of Well Shendi Take-1 [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(2): 78-86.
- [60] ExxonMobil. ExxonMobil global outlook: Our view to 2050 [EB/OL]. [2025-06-30]. <https://corporate.exxonmobil.com/sustainability-and-reports/global-outlook>.
- [61] 钱兴坤, 陆如泉. 2024年国内外油气行业发展报告[M]. 北京: 石油工业出版社, 2025.
QIAN Xingkun, LU Ruquan. 2024 Report on the development of oil and gas industry at home and abroad [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2025.
- [62] DOU Lirong, WEN Zhixin, WANG Zhaoming. Global oil and gas resources: Potential and distribution [M]. Singapore: Springer, 2024.
- [63] 贾承造, 姜林, 赵文. 全油气系统理论研究进展[J]. 石油学报, 2025, 46(7): 1217-1234, 1307.
JIA Chengzao, JIANG Lin, ZHAO Wen. Research progress in the Whole Petroleum System theory [J]. Acta Petrolei Sinica, 2025, 46(7): 1217-1234, 1307.
- [64] 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.
- [65] 何治亮, 赵向原, 张文彪, 等. 深层-超深层碳酸盐岩储层精细地质建模技术进展与攻关方向[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(1): 16-33.
HE Zhiliang, ZHAO Xiangyuan, ZHANG Wenbiao, et al. Progress and direction of geological modeling for deep and ultra-deep carbonate reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(1): 16-33.
- [66] 曾联波, 巩磊, 宿晓岑, 等. 深层-超深层致密储层天然裂缝分布特征及发育规律[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 1-14.
ZENG Lianbo, GONG Lei, SU Xiaocen, et al. Natural fractures in deep to ultra-deep tight reservoirs: Distribution and development [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(1): 1-14.
- [67] 吕心瑞, 孙建芳, 李红凯, 等. 塔里木盆地深层碳酸盐岩缝洞型油藏精细地质建模技术[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(5): 1195-1210.
LYU Xinrui, SUN Jianfang, LI Hongkai, et al. Fine geological modelling technology for deep fractured-vuggy carbonate oil reservoirs in the Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(5): 1195-1210.
- [68] 于强, 王宝江, 张禄明, 等. 深度学习技术在油气勘探中的研究进展与应用挑战[J]. 天然气工业, 2025, 45(5): 43-56.
YU Qiang, WANG Baojiang, ZHANG Luming, et al. Research progress and application challenges of deep learning technology in oil and gas exploration [J]. Natural Gas Industry, 2025, 45(5): 43-56.
- [69] 康志江, 张冬梅, 张振坤, 等. 深层缝洞型油藏井间连通路径智能预测技术[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(5): 1290-1299.
KANG Zhijiang, ZHANG Dongmei, ZHANG Zhenkun, et al. Intelligent prediction of inter-well connectivity path in deep fractured-vuggy reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(5): 1290-1299.
- [70] 窦立荣, 孙龙德, 吕伟峰, 等. 全球二氧化碳捕集、利用与封存产业发展趋势及中国面临的挑战与对策[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(5): 1083-1096.
DOU Lirong, SUN Longde, LYU Weifeng, et al. Trend of global carbon dioxide capture, utilization and storage industry and challenges and countermeasures in China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(5): 1083-1096.

(编辑 许诺)