

海洋能源勘探开发技术现状与展望

周守为¹, 李清平², 朱海山², 张厚和², 付强¹, 张理²

(1. 中国海洋石油总公司, 北京 100010; 2. 中海油研究总院, 北京 100027)

摘要: 本文简要梳理了世界深水油气勘探开发技术与深水工程重大装备的发展历程, 以及世界各大海域亿吨级大型深水油气田的开发概况。回顾了我国海洋石油特别是 1982 年中国海洋石油总公司成立后至今约 34 年的飞速发展进程, 明确了现阶段我国已具备 300 m 水深以浅的海洋石油勘探开发技术体系和装备能力, 达到 5×10^7 t 年产能, 初步建成以海洋石油 981 半潜式钻井平台为核心的深水重大工程装备, 同时我国南海第一个深水气田荔湾 3-1 气田 (水深 1 480 m) 成功投产。在此基础上, 阐述了我国海洋能源开发面临着“南台北冰”恶劣的自然条件、高粘、易凝、高含 CO_2 复杂油气藏特性、深水陆坡、远距离控制等巨大挑战, 指出我国海洋能源工程的战略目标和战略重点。

关键词: 海洋油气; 海洋工程; 海洋装备; 深水油气田开发

中图分类号: TK7 文献标识码: A

The Current State and Future of Offshore Energy Exploration and Development Technology

Zhou Shouwei¹, Li Qingping², Zhu Haishan², Zhang Houhe², Fu Qiang¹, Zhang Li²

(1. China National Offshore Oil Corporation, Beijing 100010, China; 2. China National Offshore Oil Research Institute, Beijing 100027, China)

Abstract: This paper briefly reviews the world's current deep water petroleum exploration and development technology, primary equipment, and an overview of the development situation of huge deep water oil and gas fields all over the world. Meanwhile, this study also reviews the developmental history of Chinese offshore oil exploration and extraction from 34 years ago, which began after the establishment of China National Offshore Oil Corporation. At present, CNOOC has the ability to develop the offshore oil fields within water depth of 300 meters and produce about 50 million tons oil annually. The main deepwater engineering facilities such as HYSY981 Deepwater semi-submersible drilling platform were first built. In 2014, the first deep water gas field Liwan3-1 began production. However, there are more challenges for Chinese offshore oil development efforts such as typhoons in South China Sea, ice in Bohai Bay, high viscosity and pour point, high content of CO_2 complex reservoir characteristics, remote flow assurance and control, etc.. The strategic development plan for China's future offshore energy development is presented in this paper.

Key words: offshore oil and gas; offshore engineering; offshore equipment; deep sea oil and gas field development

收稿日期: 2016-02-01; 修回日期: 2016-02-25

作者简介: 周守为, 中国海洋石油总公司, 技术总顾问, 中国工程院院士, 研究方向为海上油田高效开发技术、水合物、深水工程;

E-mail: zhoushw@cnooc.com.cn

基金项目: 中国工程院重大咨询项目“中国海洋工程与科技发展战略研究 (II 期)”(2014-ZD-5)

本刊网址: www.engingsci.cn

一、我国海洋能源工程的战略需求

占地球表面约 70% 的海洋是人类赖以生存的资源宝库^[1], 蕴藏着丰富的油气资源、天然气水合物和海洋能资源, 将成为 21 世纪人类未来重要的能源基地和战略空间。海洋能源在维护海洋权益和保障国家能源安全、缓解资源和环境的制约瓶颈、拓展国民经济和社会发展空间、建设海上丝绸之路等方面具有非常深远的战略意义和重大的现实意义。

(一) 开发利用海洋能源是保障国家能源安全的重要战略

海洋能源开发利用既是保障国家能源安全的重要举措, 又充分体现了一个国家的可持续发展能力和综合国力。对我国这样一个处于高速发展的国家而言, 海洋能源是我国能源领域的重要发展空间和战略性资源宝库, 大力发展海洋能源工程技术与装备对于维护我国海洋主权与权益、可持续利用海洋能源, 扩展生存和发展空间, 具有重大深远的战略意义。

我国经济的持续快速增长, 使能源供需矛盾日益突出。我国油、气可采资源量仅占全世界的 3.6%、2.7%^[1]。1993 年, 我国首次成为石油净进口国, 2009 年我国原油进口依存度首次突破国际公认的 50% 警戒线。2011 年, 我国超过美国成为第一大石油进口国和消费国, 当年, 官方公布的数据显示我国原油对外依存度达 55.2%, 首次超越美国的 53.5%, 2015 年我国原油净进口量为 3.28×10^8 t, 对外依存度达到 60.6%^[2]。根据中国工程院《中国可持续发展油气资源战略研究报告》, 到 2020 年我国石油需求将达 $4.3 \times 10^8 \sim 4.5 \times 10^8$ t^[2], 对外依存度将进一步提高。石油供应安全被提高到非常重要的高度, 已经成为国家三大经济安全问题之一。

目前我国海洋能源开发特别是油气开发主要集中在陆上和近海, 因此在加大近海能源开发力度、开发范围的同时, 挺进深水、自主实施深水油气资源开发、探索海洋能等海洋可再生资源开发技术是当前面临的主要任务。切实把握国际海洋能源科技迅速发展的态势和建设海洋强国、建设海上丝绸之路等战略机遇, 大力发展海洋能源开发利用技术, 实现海洋能源早日开发利用, 有效缓解我国能源的供需矛盾, 实现能源与环境的和谐发展已经成为保障国家能源安全的重要战略。

(二) 近海油气田的高效开发是充分利用海洋石油资源的战略举措

根据新一轮全国油气资源评价的结果, 我国近海石油地质资源量为 1.074×10^{10} t, 天然气地质资源量为 8.1×10^{12} m³^[3]。经过近 50 年的勘探开发, 我国近海石油已经具备了坚实的物质基础、技术保障和管理体系, 已经具备 300 m 水深的海洋油气田勘探开发技术能力, 初步建成以海洋石油 981 半潜式钻井平台为核心的深水重大工程装备。十一五、十二五期间我国石油的增量主要来自于海上。截至 2013 年年底, 已投入开发的海上油气田为 90 个 (油田 82 个, 气田 8 个), 累积产油 5.3×10^8 t, 累积产气 $1.365 8 \times 10^{11}$ m³, 2010 年建成“海上大庆”。自 2010 年开始, 国内近海油气当量一直稳定在 5×10^7 t 以上。当前我国近海油气田主要产量来自渤海, 渤海油田现有在生产油气田 42 个, 于 2010 年成功生产 3×10^7 t, 成为国家重要的能源基地, 并为建设“海上大庆”奠定了坚实的基础。2014 年 4 月我国南海第一个深水气田荔湾 3-1 (水深 1 480 m) 成功投产^[4,5]。

(三) 深水是我国海洋能源开发利用的重点领域和维护国家海洋权益的前沿

我国是海洋大国, 传统海域辖区总面积近 3×10^6 km²^[2,6]。以 300 m 水深为界, 浅水区面积约 1.46×10^6 km²、深水区面积约 1.54×10^6 km²^[1]。其中, 南海、东海、黄海与周边国家争议区面积达 1.87×10^6 km², 态势不容乐观。南海我国传统疆界内石油地质储量为 $1.643 9 \times 10^{10}$ t、天然气地质资源量为 $1.402 9 \times 10^{13}$ m³^[1], 油当量资源量约占我国总资源量的 23%, 油气资源潜力巨大; 其中 300 m 以下深水区盆地面积为 5.818×10^5 km², 石油地质储量为 8.304×10^9 t、天然气地质资源量为 7.493×10^{12} m³^[2,6]。目前我国在南海的油气勘探主要集中在北部 4 个盆地, 面积约 3.64×10^5 km²^[2,6]。周边国家在南海大规模油气勘探始于 20 世纪 50 年代中期, 特别是 70 年代以来, 越南、印度尼西亚、马来西亚、文莱、菲律宾等国家采用产量分成合同模式吸引外国石油公司投资, 勘探开发活动遍及整个南沙海域陆架区, 并延伸至我国传统疆界线以内。周边国家越南、马来西亚、菲律宾等竞争态势严峻。同时南海的战略位置十分重要, 既是太平洋和印度洋海运的要冲, 又是优良的渔场, 并蕴藏着丰富的

油气资源,在我国交通、国防和资源开发上都具有十分重要的地位。

遵照中国共产党第十八次全国代表大会作出的“海洋大开发”的重大决策,我国必须拓展经济发展的战略空间,“大力发展深海技术,努力提高深海资源勘探和开发技术的能力,维护我国在国际海底的权益”。

(四) 开发利用海洋能这一可再生资源是实现海洋绿色环保可持续发展的有效途径

我国是海洋资源大国,大陆海岸线长 1.8×10^4 km,整个海域面积达 3×10^6 km²,面积 500 m² 以上的海岛 6 900 多个。根据国家海洋局“908”专项的研究成果,我国近岸海洋能资源量约为 6.97×10^8 kW,技术可开发量为 7.621×10^7 kW^[2]。

加大高效的海洋波浪能、洋流能、温差能等综合利用技术的研发力度,有效提高获能效率,有望在深远海油气开发项目和深水孤立海岛开发中实现绿色能源的自主供给。

二、世界海洋能源开发技术的现状

(一) 海洋石油是世界油气储量增长的重要领域

世界海洋石油蕴藏量约 1×10^{11} t,其中探明约 3.8×10^{10} t。当前全世界 100 多个国家进行了海上油气勘探开发,其中约 50 个国家进行了深水油气的勘探,已在 19 个盆地获得 33 个亿吨级油气发现,其中约 70% 分布在墨西哥湾北部、巴西东南

部和西非三大深水区近 10 个沉积盆地,也称为世界深水油气勘探开发的金三角,当前世界石油产量的 34% 来自海洋^[2]。

据国际能源数据库统计,截至 2012 年,深水区共发现油气田 1 178 个,其中深水油田 682 个,深水石油储量主要分布于墨西哥湾、西非海域、巴西海域;深水气田 496 个,分布更为广泛,但天然气储量主要集中于东非海域、地中海、北海、澳大利亚西北大陆架、东南亚等地区。从国外历年可采储量统计来看,近年来深水可采储量占比呈快速增长态势,其中 2011 年、2012 年分别占总量的 56% 和 88% (见图 1)。2011 年,国外 10 大油气发现中,有 6 个位于深水区,储量占 74%^[2];2012 年,国外 10 大油气发现全部来自深水区。可见,深水区已成为储量增长的重要接替区。目前,墨西哥湾、巴西深水区产量超过浅水海域,深水海域正在成为海洋石油主要的增长点 and 世界石油工业可持续发展的重要领域。

(二) 海洋工程技术和重大装备成为海洋能源开发的必备手段

20 世纪 80 年代以来,随着海洋油气田开发规模的增大和水深的不断增加,海洋钻井、海上平台、水下生产技术、流动安全保障与海底管道等海洋工程新技术不断涌现、各类海洋工程重大装备的研发和建造速度不断加快,人类开发海洋能源的进程不断加快,高技术、高风险、高投入成为海洋能源开发的主要特点。与此同时,围绕北海油气田的

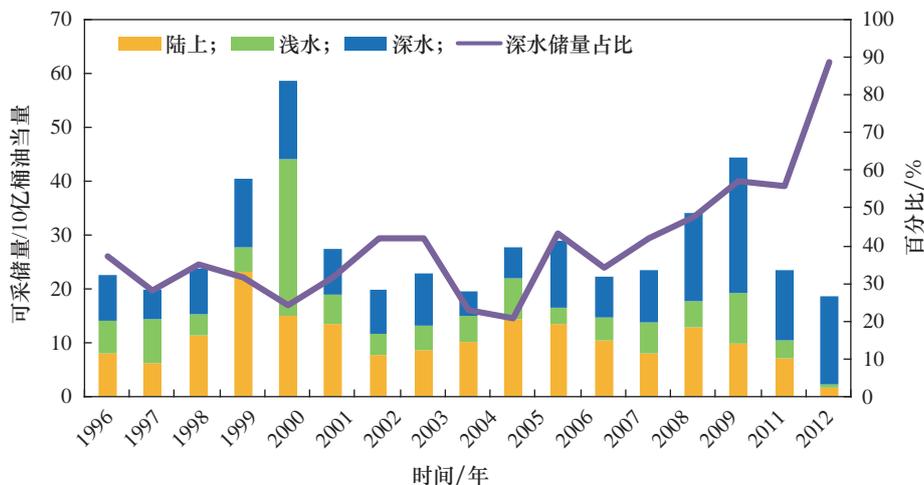


图 1 1996—2012 年国外历年可采储量

开发, 法国、挪威、英国等启动了海神计划、围绕墨西哥湾深水油气的开发, 美国启动了海王星计划、围绕巴西深水油气田的开发, 巴西石油公司等启动了 PROCAP1000、PROCAP2000、PROCAP3000 系列研究计划。借助于以上深水工程技术及装备的系列研究计划的实施, 美国、挪威、英国、巴西、新加坡等初步形成了海洋油气勘探开发和施工装备技术体系及产业化基地, 与此同时海洋油气田的开发模式由浅水单一固定平台、向水下生产设施+浮式生产设施等开发模式转变。采用水下生产技术进行开发的海上气田最远的多相混输回接距离约为 143 km、海上油田最远的多相混输回接距离约为 67 km^[7]。

目前世界范围内已经建成 3 000 m 水深深水工程作业船队^[2]: 主要包括深水多缆地震勘探船、深水勘察船、深水钻井平台、深水起重铺管船、深水辅助工作船等深水油气资源勘探开发工程装备体系。截至 2014 年, 全世界约有 34 艘深水多缆地震勘探船 (最多为 16 缆), 696 座海上钻井平台 (平均利用率 74.8%, 见表 1), 290 座深水半潜式钻井装置, 同时单吊起重能力超过 4×10³ t 的工程作业船约有 5 艘^[2]。世界范围内钻井平台的分布见图 2。

表 1 全球海洋钻井平台的近况^[2]

地域	钻井平台总数 / 个	利用率 / %
美国墨西哥湾	123	55.3
南美	130	80.0
欧洲 / 地中海	115	84.3
西非	66	75.8
中东	119	76.5
亚太	143	76.9

深水油气勘探开发工程技术发展迅速: 海洋工程技术和装备飞速发展, 浮式生产储油装置 (FPSO)、张力腿平台 (TLP)、深水多功能半潜式平台 (Semi-FPS)、深吃水立柱式平台 (SPAR) 等各种类型的深水浮式平台和水下生产设施已经成为深水油气田开发的主要装备。目前已建成水深大于 305 m 的各类深水平台 163 座、其中固定平台 2 座、顺应塔式平台 4 座、深吃水立柱式平台 18 座, 示意图见图 3、浮式生产储油装置 90 座、深水多功能半潜式平台 27 座、张力腿平台 22 座、水下井口 6

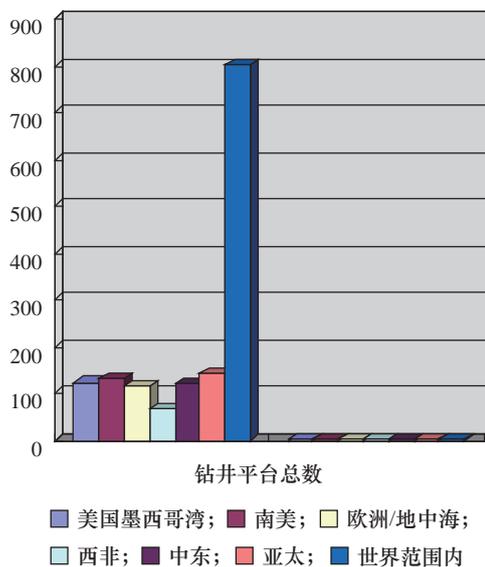


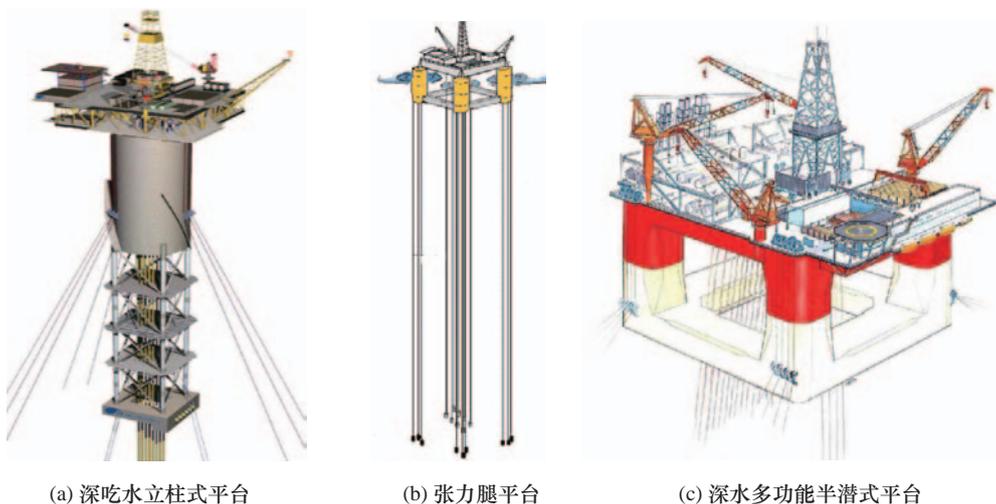
图 2 世界范围内钻井平台分布图

400 套。深水油气田开发水深记录为 2 943 m、钻探最深记录为 3 095 m^[2]。各国石油公司已把目光投向 3 000 m 以深的海域 (见图 4)^[7,8]。

当前制约深水油气勘探开发的核心技术包括: 深水大型油气田勘探技术, 深水高温高压钻完井技术, 深水浮式平台设计、建造及安装技术, 深水水下远距离控制和供电技术, 深水油气水多相油气处理与远距离集输过程流动安全保障技术, 深水海底管线和立管等关键技术。

(三) 海洋能的开发利用进入实质阶段

海洋能主要包括潮汐能、波浪能、潮流能、温差能、盐差能等, 其最常见的利用方式就是发电。迄今为止, 约有 25 个国家研制出数以百计的海洋能发电装置, 目前主要参与研究的国家、装置种类和数量见图 5。其中最早得到开发利用的为潮汐能, 目前潮汐能发电技术已经成熟并实现商业化的应用, 法国、加拿大、中国等都有潮汐能发电的成功案例, 世界上最大的潮汐电站为韩国的始华湖潮汐电站, 装机容量为 254 MW; 潮流能和波浪开发利用基础研究及应用研究基本完成, 目前进入技术示范阶段, 并启动了商业化的应用探索; 美国、日本在温差能研究方面处于技术领先的地位, 正在探索工业化应用示范, 而盐差能起步较晚, 仅荷兰和挪威进行了早期的技术示范。如何实现高的获能效率是海洋能得以开发的关键。



(a) 深吃水立柱式平台

(b) 张力腿平台

(c) 深水多功能半潜式平台

图3 深吃水立柱式平台示意图

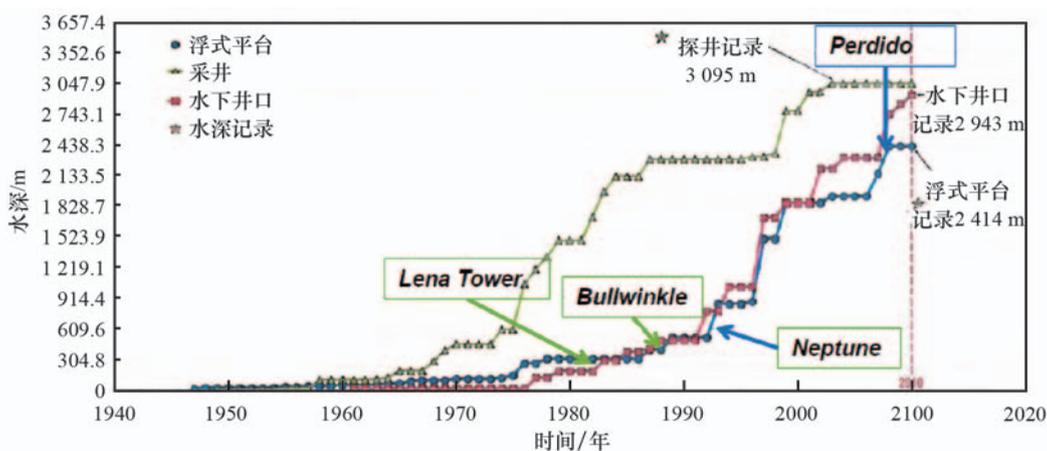


图4 深水油气田开发水深记录^[7,8]

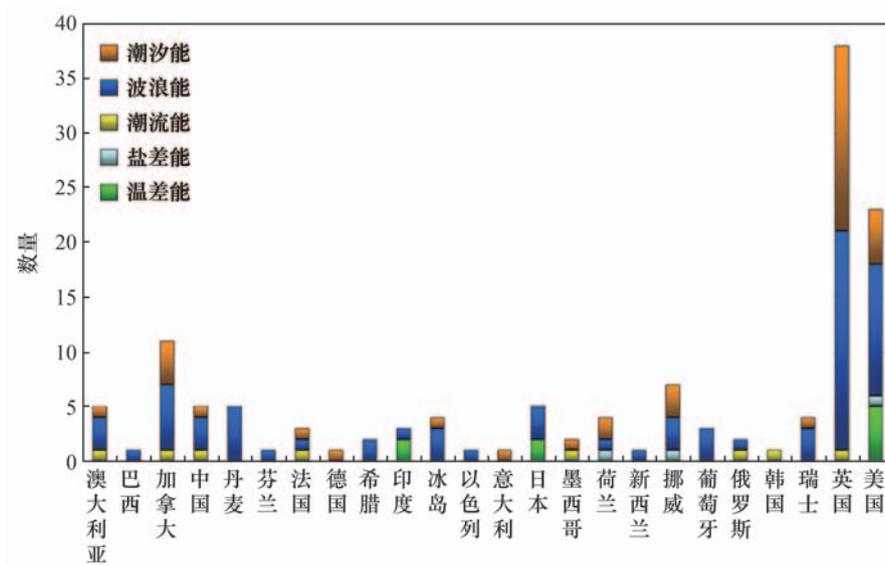


图5 参与海洋能研究的国家和装置数量

三、我国海上能源勘探开发技术现状

(一) 我国海洋石油工业的发展历程

我国海洋石油工业起步于 20 世纪 50 年代的莺歌海，1982 年中国海洋石油总公司正式成立，标志着我国海洋石油工业跨上新台阶。

三十多年来，我国海洋石油工业实现了从无到有、从合作经营到自主开发、从上游到下游，从浅水到深水、从国内走向世界、从单一油气资源的开发到综合型能源开发利用的不断发展。1983 年，我国第一个对外合作油田埕北油田建成投产，仅仅 6 年后，我国第一个自主开发的海上油气田锦州 20-2 建成投产，我国海洋石油实现了从对外合作到自主经营的转变，之后渤海绥中 36-1、渤中油田群、蓬莱 19-3、南海流花 11-1 等海上油气田相继投产，我国海洋石油用 30 年的时间实现了国外石油公司 50 年的跨越发展，年产量也从 1982 年成立之初的 9×10^4 t 迅速增加到 2010 年的 5.185×10^7 t^[3,4]，这一年我国建成“海上大庆”。当前我国海上油气田的开发区域主要包括渤海、东海、南海，以及海外墨西哥湾、西非、巴西等深水区块。我国海洋石油工业的发展历程见图 6。在海洋石油工业 34 年的发展历程中，科技创新是助力我国海洋石油工业高速发展的源动力，目前我国已具备了 300 m 水深的海上油气田自主勘探开发工程建造、运行维护的技术能力，并带动形成了配套的产业化基

地，初步建立上下游一体化、10 大技术系列，主要包括以下内容。

(二) 近海油气勘探开发技术体系不断的完善

1. 我国近海油气资源开发的现状

我国近海油气资源丰富，截至 2013 年年底，我国近海累计发现三级石油地质储量为 7.14×10^9 m³，三级天然气地质储量为 1.7534×10^{12} m³，运营在生产的油气田为 90 个，形成年产 5×10^7 t 油气当量的产能规模，按照运营计划，到 2020 年我国近海将形成 7×10^7 t 油当量的产能规模^[3]。基于已发现油气资源的分布情况，建成四大海上油气生产基地：渤海油气开发区、南海西部油气开发区、南海东部油气开发区、东海油气开发区。渤海油气开发区主要以渤海盆地勘探开发为主，目前已建成 3×10^7 t 油气当量年产规模；南海西部油气开发区主要以北部湾盆地、莺歌海盆地、琼东南盆地以及珠江口盆地西部的勘探开发为主，目前已建成 1×10^7 t 油气当量年产规模；南海东部油气开发区主要以珠江口盆地东部的勘探开发为主，目前已建成 1×10^7 t 油气当量年产规模；东海油气开发区主要以东海盆地的勘探开发为主，目前建成 1×10^6 t 油气当量年产规模^[2,3]，随着新的勘探发现，未来增长潜力很大。

2. 我国近海油气年产规模快速增长

我国近海油气田开发经历了两个主要的阶段：一是 1996 年之前，这一阶段海上油田开发处于起

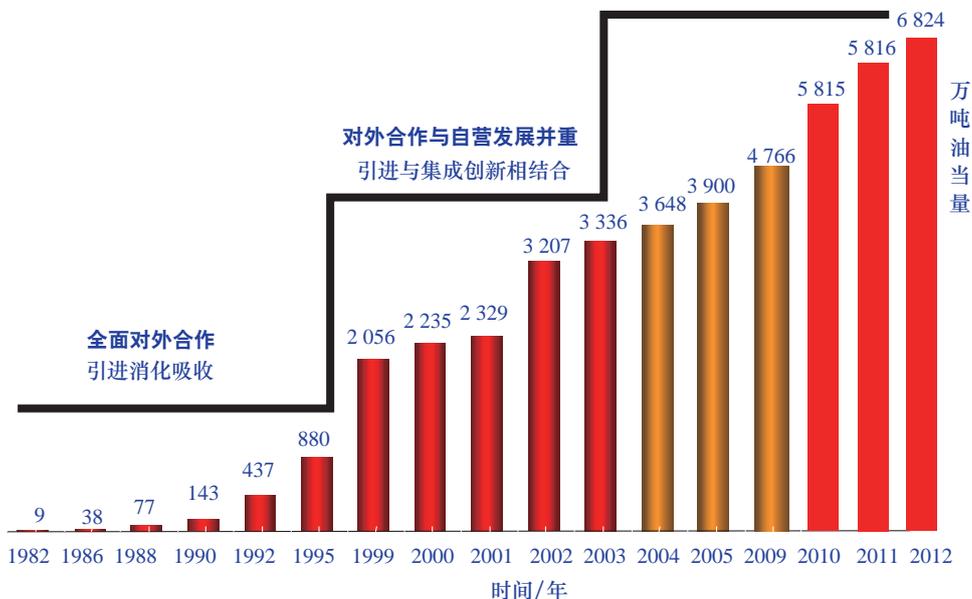


图 6 我国海洋石油工业的发展历程

步阶段，以开发海相砂岩油藏为主，1995年年产油气当量首次突破 1×10^7 t 大关，1996年油气当量接近 2×10^7 t，其中仅南海海相砂岩油田产量就超过 1×10^7 t，并自此一直稳定在 1×10^7 t 以上；二是1996年之后，这一阶段渤海的陆相砂岩油田开发迅猛增长，特别是稠油油藏。2004年国内近海油气当量突破 3×10^7 t，2008年突破 4×10^7 t，2010年油气当量突破 5×10^7 t。陆相砂岩油田产量于2005年达千万吨以上，之后快速增长，2010年实现年产 3×10^7 t^[2]。目前，我国海洋石油形成了渤海海域以油为主，南海北部、东海海域油气并举的海上油气田开发格局，图7给出近海油气产量分布。同时海外合作区块也进入开发阶段。

3. 海洋石油成为我国石油工业主要的增长点

陆地油田经过长期的勘探开发，大部分已进入勘探开发的后期，受勘探资源枯竭以及油田开发规律的影响，陆地油田产量增长难度较大，不仅如此，

大庆油田、胜利油田等陆地典型老油田的产量已进入递减阶段。图8给出了1971年到2013年全国石油产量构成柱状图，全国石油产量整体上呈稳步增长的趋势，但中国石油天然气股份有限公司、中国石油化工集团公司等以陆地油田为主的公司年产油增长缓慢，自1990年以来，全国石油增长总量的60%^[2]来自中国海洋石油总公司。我国近海油气资源丰富，勘探开发的程度远低于陆地，尚处于蓬勃发展期，近海油气田将是我国油气产量主要的增长点。

当前中国海洋石油总公司年产油气当量规模在 5×10^7 t，根据中国海洋石油总公司的发展规划，到2030年国内海上将建成 1×10^8 t 油气当量年产规模^[2]，未来17年将增加一倍的产能，届时近海油气产量在我国石油产量构成中的比重将更加突出，近海油气对我国国民经济的支撑作用将更加凸显。

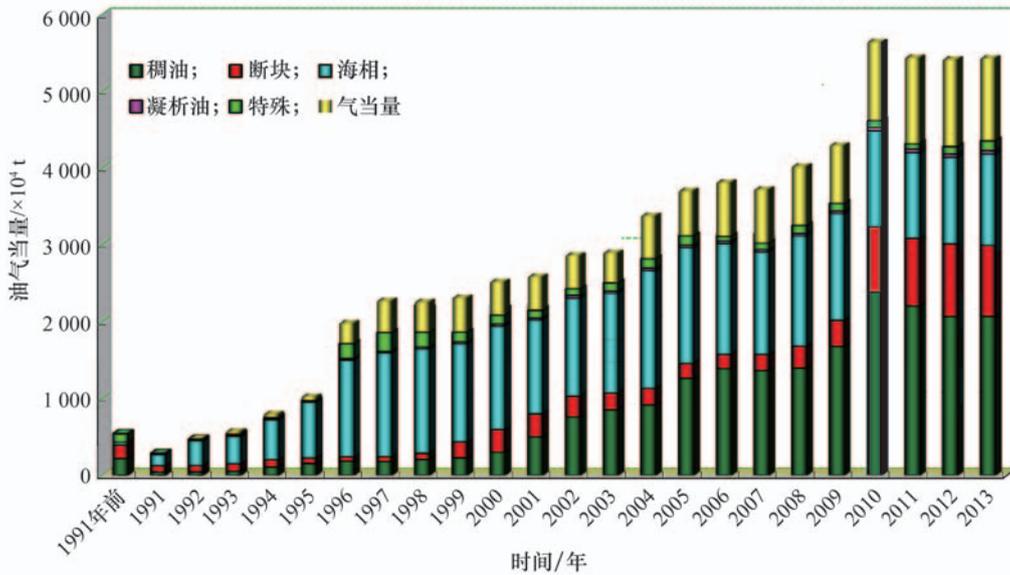


图7 我国近海历年产油量分布图

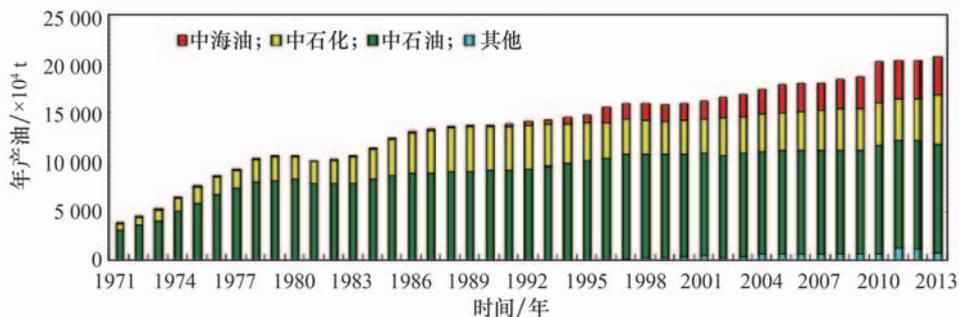


图8 全国石油产量构成柱状图

4. 近海油气田高效开发技术体系基本建立

海上油气田开发是一项复杂的技术密集型产业，需要勘探、开发、工程、环保、经济等多学科协同合作。经过长时间的摸索，我国已构建了一套完善的近海油气田高效开发技术体系（见图9）与科技发展战略。首先，秉承一体化的开发理念，包括勘探开发一体化、油藏工程一体化和开发生产一体化三个方面，将各学科紧密地联系起来，使各专业工作更有针对性、目的性，通过协同合作，提高工作效率，压缩开发成本；其次，构建完善的技术体系，形成整体加密及综合调整技术、稠油热采技术、聚合物驱技术三大海上油气田开发及提高采收率技术体系，为近海不同类型油气藏高效开发提供技术支撑；最后，建立完备的保障体系，包括安全保障和环保保障，确保近海油气田在实现高效开发的同时，不存在人身安全隐患和环境污染问题，创建和谐的社会人文环境，为海上油气田的高效开发保驾护航。

(三) 深水工程重大装备和深水油气勘探开发技术

我国南海蕴藏着丰富的油气资源，其中南海60%以上海域水深在300m以上。我国海洋石油工作者从20世纪80年代末开始跟踪国外深水油气勘探的开发进展，1996年通过对外合作实现了我国第一个水深超过300m的油田流花11-1的开发，实现我国深水油气田开发零的突破；2006年流花11-1油田由合作开发转变为自主经营，同时我国已经具备自主进行1500m深水油气田开发方案前期研究的能力^[2,7,8]。标志性阶段成果如下。

1996年，中国海洋石油总公司与阿莫科东方石

油公司合作、应用水下生产系统、一座半潜式生产平台、1艘浮式生产储卸油轮浮式生产储油装置开发水深310m的流花11-1油田，这是我国海域第一次应用了水下生产技术，并采用了电潜泵完井的水下卧式采油树、水下湿式电接头、水下电潜泵等当时7项世界第一的创新技术；目前流花11-1油田还是南海东部最大的深水油田。

1997年，中国海洋石油总公司与挪威石油公司合作仅用一艘浮式生产储卸油轮浮式生产储油装置和水下生产系统就实现了水深333m的陆丰22-1这一深水边际油田的开发^[2,7]，并在全世界第一次使用了海底增压泵，成为世界深水边际油田开发的范例。

1998年、2000年，实现了惠州32-5、惠州26-1N水下油气田的开发。

2005年我国与越南、菲律宾签署了联合海洋地震工作的协议；2006年荔湾3-1气田勘探取得重大的成果，钻遇水深1480m的荔湾3-1-1井^[2]。

自主经营和自主设计、自主建造。2006年，流花11-1油田由合作开发转变为自主经营，同年，我国仅有1年的时间，自主修复了因珍珠号台风损害的流花11-1气田输油软管和锚链，比国外技术提前1年复产。

2006年国内首次自主完成了乐东22-1浅层水下生产系统开发方案的基本设计；2012年，我国自主设计的第一个采用水下生产系统开发的气田崖城13-4气田建成投产，并首次实现管道终端连接器和管汇的国产化；2012年，我国主导设计的远距离回接的油田流花4-1顺利投产；2013年，我国自主设计的流花19-5、番禺35-1/35-2建成投产，使用了

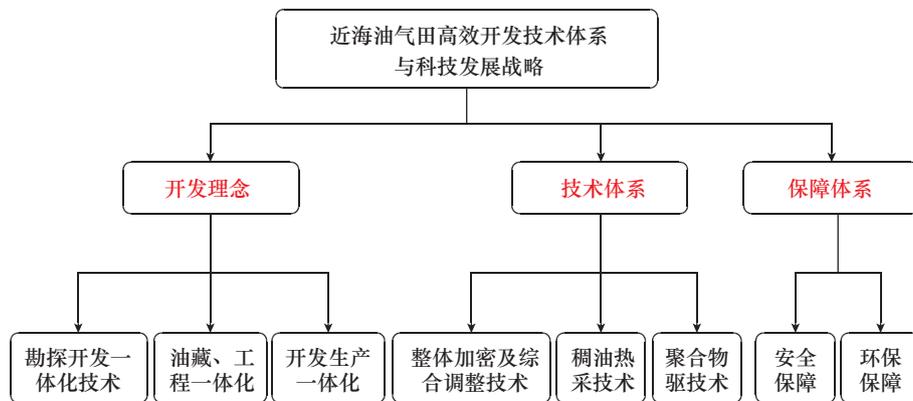


图9 近海油气田高效开发体系框图

国产管汇；2014年，我国第一个水深超过1400 m的深水油气田荔湾3-1建成投产^[2]；2015年，我国第一个自营深水气田陵水17-2前期研究启动，首次完全自主进行深水气田的前期研究，成为我国深水工程设计的重大转折点。

初步建成深水工程重大装备作业船队和1500 m水深油气田开发核心技术体系。2011年，我国初步形成以海洋石油981为代表的、具备3000 m水深作业能力^[2,7]、五型多类深水工程重大专业装备，包括海洋石油720深水地球物理勘探船、海洋石油981深水半潜式钻井平台、海洋石油708深水勘察船、海洋石油201深水起重铺管船、深水三用工作船等；海洋石油201深水起重铺管船完成了我国第一个深水气田荔湾3-1气田深水药剂管道的铺设；海洋石油981深水半潜式钻井平台（见图10）完成水深2480 m的深水气田钻井作业并进行首次深水测试作业^[2,7]。海洋石油708深水勘察船完成了深水水下采油树的自主安装，深水陆坡工程地质、物探调查作业。

通过国家科技重大专项、国家高技术研究发展计划（863计划）等持续支持，我国初步突破深水勘探、深水钻完井、深水平台、水下生产设备、流动安全保障技术、深水立管和海管等核心技术，具备1500 m水深深水油气田相关实验研究、设计和运行管理技术体系。

2006年，荔湾3-1-1井的钻探成果拉开了我国

南海深水油气勘探的序幕。2014年4月，通过位于水深约1480 m的深水水下回接系统、两条79 km海底油气水多相混输管道回接到位于水深约200 m处的荔湾3-1中心平台进行开发的荔湾3-1气田顺利投产，实现了我国海上油气田开发水深从333 m到1480 m的跨越，同时在荔湾3-1深水气田海上施工作业中我国自主研发重大装备和深水工程技术得到了示范验证和提升。

（四）海洋能开发利用逐步启动

我国开发利用的海洋能主要是潮汐能，目前是世界上建造潮汐电站最多的国家之一，近海潮汐能资源技术可开发装机容量大于500 kW的坝址共有171个，以浙江和福建沿海数量最多，浙江省可开发的潮汐能资源装机容量为 5.699×10^7 kW，福建省的潮汐能年平均功率密度最大，平均值为 $3276 \text{ kW} \cdot \text{km}^{-2}$ ，同时我国启动了潮流能、波浪能机理研究和现场示范，并启动温差能的室内研究和探索。

四、我国海洋能源勘探开发所面临的挑战

以海洋石油为主的我国海洋能源工程技术和装备虽然取得了长足的进步，但与世界先进水平还有很大的差距，还无法满足我国海上能源开发的实际需求。“北冰南台”、内波、海底砂脊、砂坡等恶劣

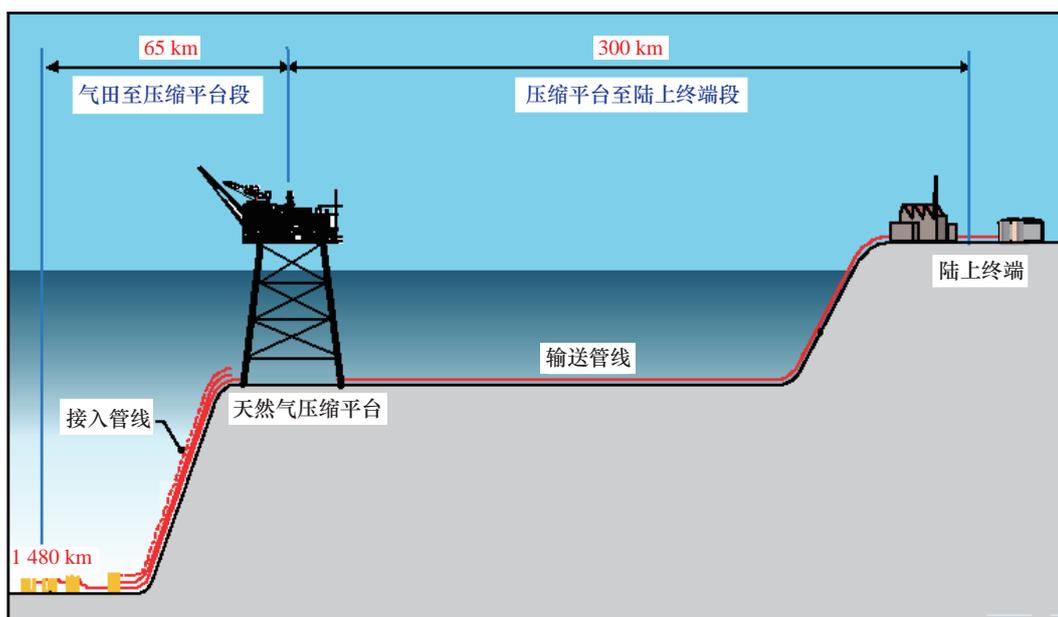


图10 荔湾3-1气田开发示意图

的自然环境、高粘、高凝、高含 CO₂ 等复杂的油气藏特性,使我国海洋能源的开发面临着巨大的挑战,主要表现在以下几个方面。

(一) 近海低品位油气储量大,亟待技术攻关

我国近海纳入规划稠油地质储量为 2.58×10^9 t, 占总地质储量的 57%, 近海稠油油田采出程度低 (12%), 采收率低 (24%)。地下原油粘度在 350 mPa·s 以下的常规稠油三级地质储量为 1.58×10^9 t, 水驱采收率仅为 22.2%, 若按照一般普通油藏水驱采收率 40% 以上的标准计算, 该类油藏采收率还可以提高 17.8%, 即还可增产 2.8×10^8 t, 相当于 2013 年全国的石油产量, 潜力是十分巨大的; 粘度在 350 mPa·s 以上的非常规稠油三级地质储量为 7.4×10^8 t, 目前动用程度仅为 13%, 仅形成了年产能 5×10^5 t 的规模。非常规稠油资源中, 粘度在 1 000 mPa·s 以下的占 39%, 粘度在 1 000~10 000 mPa·s 的占 30%, 粘度在 10 000 mPa·s 以上的占 31%, 表 2 给出了我国稠油储量分布表。不同于陆地稠油油田的开发, 海上油田开发由于平台面积受限, 面临许多陆上油田不存在的问题, 许多陆上稠油油田现有开发技术难以在海上油田得到应用。因此稠油油田开发面临采出程度低, 采收率低等难题。

表 2 我国稠油储量分布表

油藏类型	粘度 / mPa·s	三级地质储量 / $\times 10^8$ t
普 I 类	50~150	9.2
普 II 类	150~350	6.59
	350~10 000	5.08
特稠油	10 000~50 000	2.32
超稠油	>50 000	—

(二) 缺少近致密气开发的技术和经验

东海天然气资源丰富, 总地质资源量为 7.4×10^{12} m³, 以常规低渗和近致密气为主, 特别是西湖凹陷常规气和近致密气分别占 1/3 和 2/3。近致密气藏由于储层渗透性差, 采用常规的气田开发方法, 单井产能低, 难以经济有效开采。当前近海常规低渗和近致密气的开发存在三个难题: 一是中国海洋石油总公司目前开发的近海气田主要是中高孔渗, 缺乏海上低孔渗油气田高效开发的经验; 二是海上

低孔渗油气田钻完井成本居高不下; 三是海上低渗油气储层改造相关配套的研究和技术欠缺。

(三) 深水工程装备作业和工程开发技术的差距

我国已投产的深水油气田开发水深记录为 1 480 m, 世界记录为 2 943 m。2011 年我国初步五类多型深水工程重大装备初步具备深水作业的能力, 但深水重大装备的概念设计、配套作业装备几乎全部依赖进口。

(四) 复杂的环境条件

我国海域具有“北冰南台”的环境特点, 同时有陆坡区滑塌、浅层气、陡坎、浊流沉积等工程地质风险、内波、海底砂脊砂坡等灾害环境。我国南海百年一遇台风波高为 12.9 m, 与墨西哥湾相等, 是西非海域的 3 倍, 而我国百年一遇台风表面流速和风速接近墨西哥湾的 2 倍、西非的 4 倍。

(五) 高粘、高凝、高 CO₂ 复杂油气藏的特性

我国海上油气藏特性复杂, 主要表现为: 超深水 3 000 m、埋深大于 5 000 m; 含 CO₂ 高 (平均在 3%~46%), 最高含量为 85%; 高凝点: 平均为 32 °C、最高为 45 °C; 高温高压: 海外深水权益区和莺琼盆地高温高压分别为 180 °C、124 MPa。

(六) 海洋能开发利用迫切需要高效获能技术

因环境问题, 我国新建的潮汐能发电站项目不多, 潮流能和波浪能尚处于示范阶段, 其装置的可靠性、稳定性、安全性还待完善, 同时获能效率低。技术和成本制约导致我国海洋能资源开发利用率低, 产品化和商业化的程度不高, 与国外有关国家相比, 存在较大的差距。

五、我国海洋石油工业发展战略

(一) 战略定位与目标

1. 战略定位

以国家海洋大开发战略为引领, 以国家能源需求为目标, 大力发展海洋能源工程核心技术和重大装备, 加大近海油气田区域开发, 稳步推进中深水勘探开发进程, 探索天然气水合物、海洋能等新能源的开发利用, 保障国家的能源安全和海洋权益,

为走向世界深水大洋做好技术储备。

2. 战略目标

实现由 300 m 到 3 000 m、由南海北部向南海中南部、由国内向国外的实质跨越，2020 年部分深水工程技术和装备跻身世界先进行列，2030 年部分深水工程技术和装备达到世界领先水平，建设渤海综合型能源供给基地、南海气田群、油田群示范工程和绿色能源示范基地，助力“南海大庆”和“海外大庆”(各 5×10^7 t 油气当量)。

(二) 发展战略

从国家层面，制定海洋能源勘探开发战略，兼顾引进、集成创新和自主创新，集国内外的优势研究力量，以近养远，以民掩军，建立海洋能源技术创新平台、突破海洋能源开发核心技术，带动相关海洋能源产业基地和产业链的建设，占领海洋能源勘探开发技术的制高点，维护我国的海洋权益，保障国家的能源安全。海洋能源工程技术发展路线图见图 11。

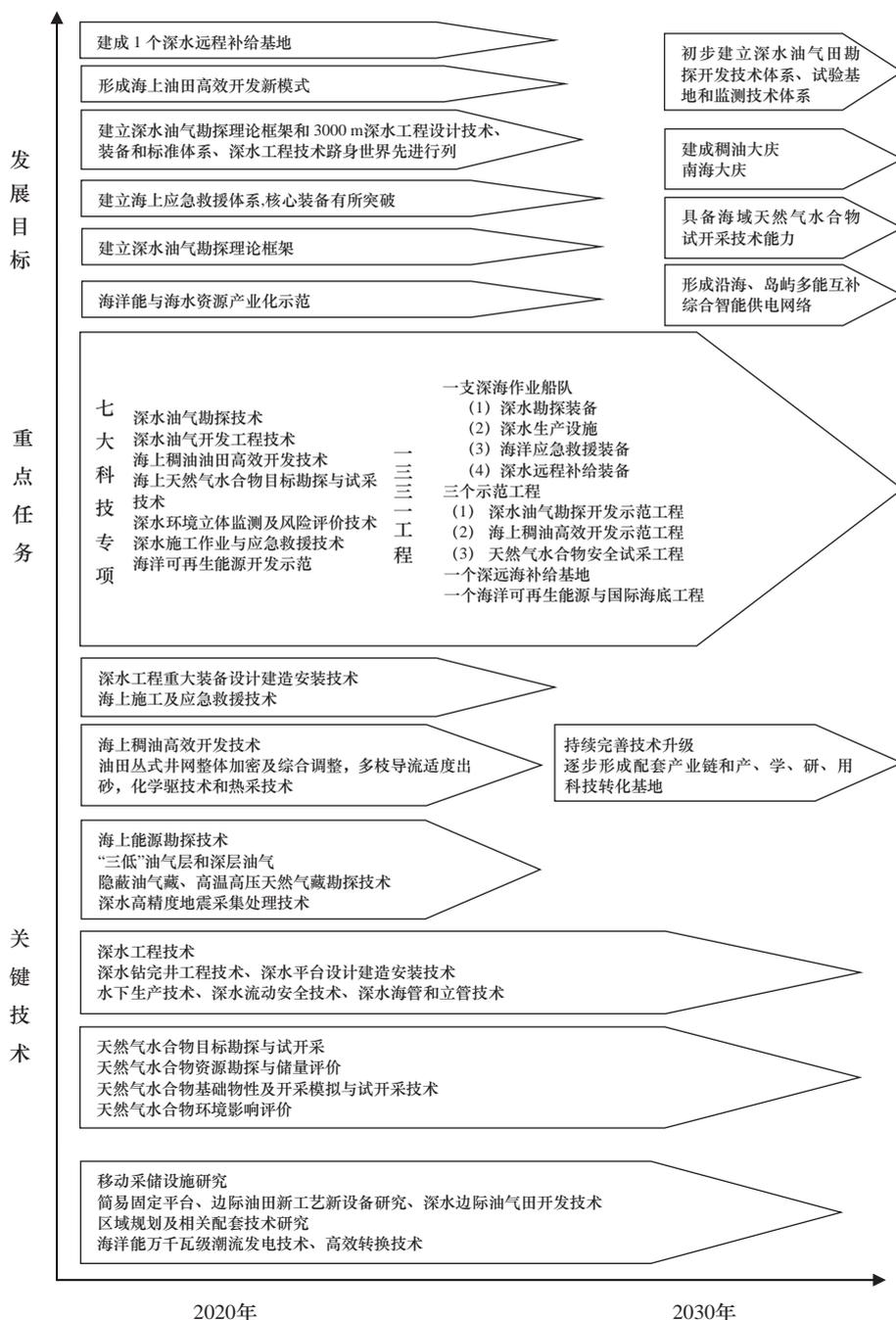


图 11 海洋能源技术发展路线图

(三) 战略重点

围绕海洋能源开发与迫切需求,从国家层面围绕海洋能源工程重点领域开展重大科技专项、重大装备与示范工程一体化科技攻关策略,实现产、学、研、用一体化科技创新思路和科技成果转化机制,带动海洋能源工程上下游产业链的发展。重点领域主要包括以下几方面。

(1) 近海油气高效开发技术:重点开展海上油田整体加密调整技术、多枝导流适度出砂技术、海上油田化学驱油技术、海上稠油热采技术研究,加快致密气开发技术和装备的研发力度。

(2) 深水油气勘探技术:重点开展深水被动大陆边缘油气成藏理论,深水高精度地震采集技术和装备、处理解释技术,深水大型隐蔽油气藏识别技术,深水少井/无井储层及油气预测技术等核心技术攻关。

(3) 深水油气开发工程技术:重点开展深水环境荷载和风险评估、深水钻完井及高温高压工程技术、深水平台及系泊技术、水下生产设施国产化、深水流动安全保障技术、深水海底管道和立管、深水施工安装等技术研究。

(4) 海上应急救援技术:重点开展深远海应急救援总体技术方案、井喷失控水下井口封堵技术及装备系统、深远海应急救援后勤补给保障技术等应急救援技术和装备研究。

(5) 海洋能开发利用技术探索:重点开展海洋波浪能、潮流能的技术产业化、探索温差能、盐差能等的利用模式和示范。

(四) 重大工程

(1) 建立渤海国家级油气能源基地。针对渤海丰富的稠油资源储量,勘探开发相对成熟,可将其建成国家重要能源基地和中国海洋石油总公司“以近养远”的战略基地。在2020—2030年力争稳产 4×10^7 t 油气当量年产规模。

(2) 建立东海国家天然气稳定供应基地。东海油气开发区天然气资源丰富,勘探开发程度低,潜力较大,且气田开发不同于油田开发,需要构建产销一体的供气管网以及稳定的下游销售,因此东海油气区的开发战略应着眼整体布局、上下游双向调节,同时还要紧密结合国家战略需求可将其建成国家天然气稳定供应基地。

(3) 建立南海北部深水油气开发示范区。以荔湾3-1气田群,陵水气田群\流花油田群为依托建成南海北部气田群和油田群,建立深水工程技术、装备示范基地,为南海中南部深水开发提供保障。

(4) 建立深水工程作业船队和应急救援装备、作业体系。以海洋石油勘探、开发、工程、应急救援需求为主线,建立地球物理勘探、工程地质勘察、海上钻井和工程实施装备体系,为深水油气田自主开发提供基础和保障。

(5) 南海波浪能与温差能联合开发示范基地。调研我国南海温差能和波浪能资源分布的情况和海洋环境,选择离岸距离小于2 km、水深大于800 m的海域作为开发场址。根据实地环境的特点和应用需求,进行南海波浪能和温差能开发技术研究和测试示范。

六、结语

以海洋油气为例我国海洋能源开发利用取得了长足的进步,具备了300 m水深以浅海上油气田自主勘探的开发能力,同时自主钻探水深记录已达到2 447 m,合作开发油气田水深记录为1 480 m,同时完成了500 kW海洋潮流能和波浪能的发电技术示范项目。

总体而言,我国海洋能源技术与国外先进水平相比还有很大的差距,特别是在深水油气开发的技术领域,深水钻完井、深水工程技术、应急救援技术等已经成为制约我国深水油气资源开发的瓶颈。因此站在国家能源安全的高度,制定中长期海洋能源科技发展战略,充分利用和调动社会资源,加大国际合作力度,开展覆盖地下、水中、水面的海洋能源勘探开发工程核心技术攻关、进行深水钻井平台、深水起重铺管船、深水浮式生产平台、深水应急救援装备四类多型装备研发,加快建立具有综合竞争力的海洋能源工程创新技术体系,占领海洋能源开发技术的制高点,维护海洋的权益、保障国家能源的安全,任重而道远。

致谢

本专题研究工作得到中国工程院项目组,国土资源部油气资源战略研究中心,中国海洋石油总公司等各级领导的大力支持,同时得到中海石油(中国)

有限公司勘探部、中海油研究总院等各级领导以及社会各界专家的帮助。在此一并谨致谢忱！

参考文献

- [1] 朱伟林, 米立军. 中国海域含油气盆地图集[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011.
Zhu W L, Mi L J. China Offshore Basin Map Set [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [2] 周守为, 曾恒一, 李清平, 等. 海洋能源科技发展战略研究报告[R]. 北京, 2015.
Zhou S W, Zeng H Y, Li Q P. Research Report of offshore resources development strategy [R]. Beijing, 2015.
- [3] 侯祥麟. 中国可持续发展油气资源战略研究报告[R]. 北京: 中国工程院, 2005.
Hou X L. The sustainable development of oil and gas resources strategy research report China [R]. Beijing: Chinese Academy of Engineering, 2005.
- [4] 朱伟林, 张功成, 钟凯. 中国南海油气资源前景[J]. 中国工程科学, 2010, 12(5): 46–50.
Zhu W L, Zhang G C, Zhong K. South China Sea oil and gas resources prospect [J]. Engineering Sciences, 2010, 12(5): 46–50.
- [5] 刘宝明, 夏斌, 祝有海, 等. 我国南海南部油气远景评价——兼论“九五”期间南海新的勘查动态[C]. 我国专属经济区和大陆架勘测专项研究文集, 北京: 海洋出版社, 2002.
Liu B M, Xia B, Zhu Y H, et al. Oil and gas prospect evaluation of the southern part of south china sea—The South China Sea new exploration dynamic during “the Ninth Five Year Plan” [C]. Proc of China’s Exclusive Economic Zone and Continental Shelf Survey Research, Beijing: Ocean Press, 2002.
- [6] 马文宏, 何家雄, 姚永坚, 等. 南海北部边缘盆地第三系沉积及主要烃源岩发育特征[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(1): 41–48.
Ma W H, He J X, Yao Y J, et al. The development characteristics of the South China Sea third northern marginal basin sedimentary system and hydrocarbon source rock [J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(1): 41–48.
- [7] 李清平, 曾恒一. 驶向深海[J]. 中国远洋商务, 2012, 7.
Li Q P, Zeng H Y. Going deepwater [J]. China Ocean Business, 2012, 7.
- [8] 李清平. 深水油气开发有多难[N]. 北京日报, 2012–5–30.
Li Q P. How have the deepwater oil and gas exploration [N]. Beijing Daily, 2012–5–30.