

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.285

引用格式: 邵明娟, 张炜, 王海华, 等. 美国甲烷水合物研发计划发展历程及进展[J]. 中国地质调查, 2025, 12(3): 19–26.
(Shao M J, Zhang W, Wang H H, et al. History and progress of methane hydrate research and development program in the United States[J]. Geological Survey of China, 2025, 12(3): 19–26.)

美国甲烷水合物研发计划发展历程及进展

邵明娟^{1,2}, 张炜^{1,2*}, 王海华^{1,2}, 姚树青^{1,2}, 孙张涛^{1,2}

(1. 中国地质调查局地学文献中心, 北京 100083; 2. 中国地质图书馆, 北京 100083)

摘要: 美国于2000年设立了国家级水合物研发计划, 20多年来在各个领域取得了丰硕的成果, 并已于2024年7月30日完成了全球首次长期陆域试采。介绍了美国的能源政策对水合物研发工作的部署影响, 并对美国水合物研发计划的组织结构和经费投入情况进行整理, 重点对水合物研发计划下设立的98个项目进行梳理, 按照资源勘查与评价、生产技术、室内实验与数值模拟和环境效应领域进行分类分析, 以查清美国水合物研发计划的发展趋势, 并对计划的成果亮点进行了总结。分析认为: 美国的水合物研发计划组织合理有力, 充分利用了政府机构、高校、科研机构 and 民企各自的优势力量; 计划部署有序, 基础科学研究、资源勘查评价、试采协同发展, 互相促进; 水合物研发受能源政策的影响, 近些年有渐冷趋势。研究成果可为我国提高水合物产业开发能力提供借鉴和资料参考。

关键词: 美国; 甲烷水合物; 研发计划; 能源政策; 试采

中图分类号: P618.13

文献标志码: A

文章编号: 2095–8706(2025)03–0019–08

国家级水合物研发计划。

0 引言

针对1973年爆发的第一次世界石油危机, 美国政府提出了“能源独立”战略。20世纪70—80年代, 美国政府为鼓励替代性燃料的研究, 针对新能源研发提供了多项拨款, 这为水合物研发工作提供了政策基础^[1–2]。在由美国主导实施的深海钻探计划(deep sea drilling program, DSDP)的多个航次中, 证实在全球大陆边缘和斜坡沉积层内普遍存在甲烷水合物(以下简称水合物)^[3]。1995年, 美国地质调查局采用成藏组合分析方法完成了对美国水合物资源量的详细评估, 利用同年进行的国际大洋钻探计划(ocean drilling program, ODP)第164航次的的数据进行了校正, 中值为5 663.36 万亿 m³。这比估计的美国常规天然气资源量(39.64 万亿 m³)高出100倍以上^[4]。巨大的资源潜力再加上国际社会对水合物资源的日益关注, 促使美国制定并启动了

1 美国能源政策变化下的水合物研发工作部署

自1993年以来, 随着美国能源政策的调整, 水合物研发工作在其能源结构组成中的地位也有所变化(表1)。从克林顿政府到奥巴马政府, 都延续了以实现“能源独立”、保障能源安全为首要目标。其中, 克林顿政府能源政策的核心思想是“可持续发展”, 在鼓励发展替代性能源的同时也鼓励开展深海油气钻探, 在阿拉斯加州开放了更多的土地用于钻探^[5–6]。此外, 克林顿政府在1998年和1999年相继发布《甲烷水合物研发战略》和《国家甲烷水合物多年研发计划》后^[4], 于2000年通过《甲烷水合物研发法案》^[7]授权美国能源部牵头实施国家级水合物研发计划。布什政府面临着20世纪70年代以来美国最严重的能源短缺危机, 为此更加关

收稿日期: 2024–08–12; 修订日期: 2024–09–13。

基金项目: 中国地质调查局“地球科学文献知识服务与决策支撑(编号: DD20230139)”“清洁资源情报跟踪与研究(编号: DD20230602)”及“天然气水合物产业化政策保障研究(编号: DD20243520)”项目联合资助。

第一作者简介: 邵明娟(1982—), 女, 高级工程师, 主要从事水合物等非常规能源情报研究工作。Email: shaomingjuan@163.com。

通信作者简介: 张炜(1981—), 男, 正高级工程师, 主要从事地质科技战略情报研究工作。Email: zhgwei@mail.cgs.gov.cn。

表 1 美国能源政策与甲烷水合物相关战略规划^[1-16]

Tab. 1 Roadmap of the United States energy policy related with methane hydrate^[1-16]

阶段	能源短缺			页岩革命实现能源独立	清洁、可再生能源转型
历届总统	比尔·克林顿 (1993—2001)	乔治·布什 (2001—2009)	贝拉克·奥巴马 (2009—2017)	唐纳德·特朗普 (2017—2021)	乔·拜登 (2021—2024)
能源政策特点	维持能源稳定供应,保护环境,促进可持续发展	增加国内能源供给,实现能源供给多元化	发展新能源,实现能源经济转型,保障能源安全	积极发展化石能源,大规模勘探开发国内油气资源,实现能源独立	制定“清洁能源革命计划”,取消化石燃料补贴,支持清洁能源创新
水合物相关的法律法规及战略等	《甲烷水合物研发战略》《国家甲烷水合物多年研发计划》《甲烷水合物研发法案》	《2005 年能源政策法案》《机构间甲烷水合物研发路线图》《2007 财年甲烷水合物 5 年研发计划》	《跨机构甲烷水合物研发计划(2015—2030)》《甲烷水合物研发路线图: 2015—2030》	《美国水合物研发计划 2020—2035 年路线图》	无

注油气产业的发展^[8]。鉴于美国国家能源政策委员会 2004 年报告指出美国可能拥有全球 25% 以上的水合物储量,布什政府于 2005 年通过的《2005 年能源政策法案》对《甲烷水合物研发法案》进行了重新授权,并提出了对其生产的激励^[9-10]。奥巴马政府注重清洁能源的发展,同时没有偏废化石能源,积极鼓励开发近海油气以减少对进口石油的依赖^[11]。

21 世纪以来,美国页岩革命使其油气产量大幅增加,实现了能源独立,重塑了世界油气供给格局。特朗普政府提出“能源主导”战略,发布的《美国优先能源计划》宣布要大力支持石油、天然气等传统化石能源的产业发展^[5-6,12]。美国地质调查局 2018 年发布的《能源资源计划的未来方向》报告,对如何在未来 10~15 a 开展研究并形成产品、如何更有效地确定能源研究的优先事项、以及如何满足美国政府的能源

需求提出了相关建议,其中将水合物、地热能和地下储能等视为值得优先开展地质研究的新兴“技术”^[13]。

2021 年拜登就任美国总统后,明确提出了“3550”气候长期治理目标,即限制化石能源开采,并加快推进清洁能源发展^[14-16],美国的能源结构将从以化石能源为主转向以可再生绿色能源为主,并在全社会推动去碳化目标,这使得美国对水合物资源的关注趋冷。

2 美国水合物研发计划的组织与部署

2.1 组织结构

美国水合物研发计划的实施由美国能源部牵头,组织美国联邦机构、高校、国家实验室、工业界和国际参与者共同推进(图 1),由美国能源部化石能源

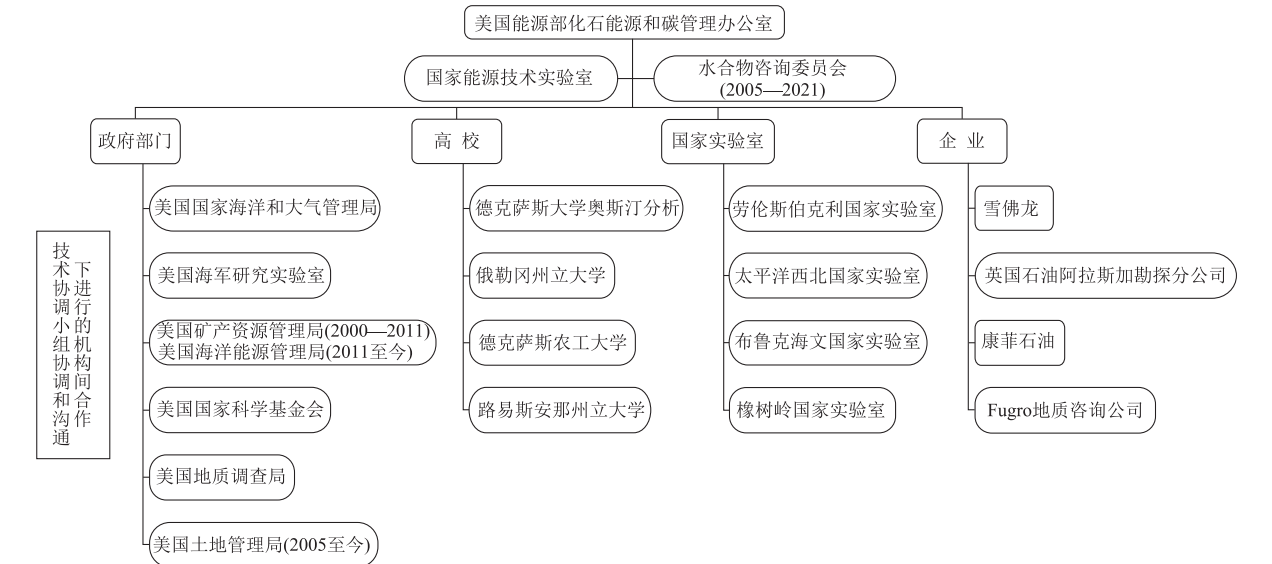


图 1 美国水合物研发计划组织结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the organizational structure of the United States hydrate research and development program

和碳管理办公室负责管理,由国家能源技术实验室负责具体实施,由根据《2005 年能源政策法案》成立的水合物咨询委员会负责水合物计划的阶段性规划编制、报告编写等,由参与计划的所有联邦机构的代表组成的技术协调小组负责组织协调各机构间的合作(图 1)。水合物研发计划广泛吸引了科研界和工业界的参与,同时接受外部科学监督,美国能源部还积极参与了国际大洋钻探计划和其他国家的水合物计划。美国能源部于 2021 年 1 月 13 日宣布终止水合物咨询委员会相关工作,并于同日宣布成立未来燃料咨询委员会,以对包括水合物研发项目在内的替代性燃料的开发和相关问题向美国能源部长提供咨询和建议。对美国能源部财年预算报告的统计表明,2001 年至 2023 年国家财政对水合物研发工作的投入总计约 3.05 亿美元,另外来自能源部其他项目的投入约 0.23 亿美元(图 2)。

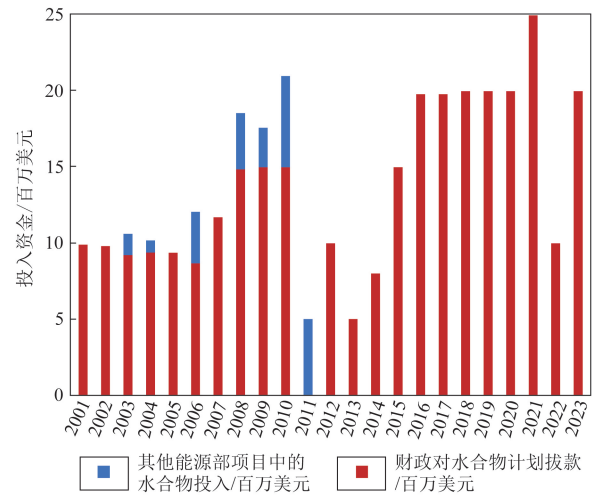


图 2 美国水合物研发计划财政投入情况^[17-35]

Fig.2 Financial investment in the United States hydrate research and development program^[17-35]

2.2 项目部署

美国水合物研发计划正式设立的时间为 2000 年,但美国能源部网站显示最早的项目设立于 1997 年。截至 2024 年 8 月 1 日,该计划共部署实施项目 98 个,其中已完成项目 95 个,在研项目 3 个^[36],可具体分为 4 类,即资源勘查与评价类、生产技术类、室内实验与数值模拟类、以及环境效应类,各类项目的数量和经费投入统计见表 2,此处的经费投入来源于能源部网站各个项目网页^[36]。

表 2 美国水合物研发计划 4 类项目的数量及经费投入情况

Tab.2 Number and funding of 4 types of projects in the United States hydrate research and development program

项目类别	项目数量/个	能源部经费/百万美元	项目参与方配套经费/百万美元	总经费投入情况/百万美元
资源勘查与评价类	33	62.4	56.8	119.2
生产技术类	12	56.3	44.6	100.9
室内实验与数值模拟类	34	26.9	4.0	30.9
环境效应	19	19.5	6.3	25.8

2.2.1 资源勘查与评价类

资源勘查与评价类项目共计 33 个,主要目的是识别和表征美国陆上和近海地区的水合物资源情况。该类项目的设立主要集中于 2000 年、2006 年和 2012 年左右,自 2013 年以来立项数量减少(图 3),目前在研项目 2 个,一个是由美国地质调查局牵头实施的围绕陆域和海域水合物潜在赋存区的地质、地球物理、资源和环境调查,另一个是德克萨斯大学奥斯汀分校的墨西哥湾保压取心项目。

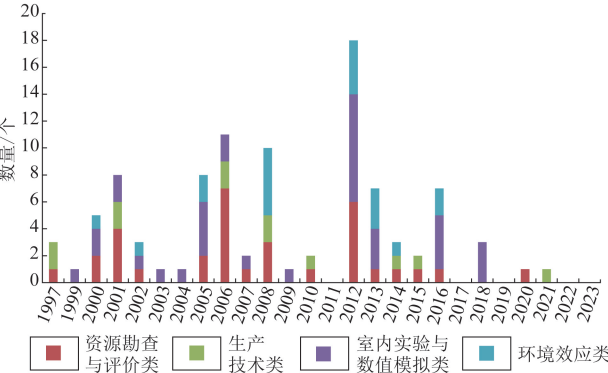


图 3 4 类项目的年度立项数量

Fig.3 Annual number of approved projects for 4 types

资源勘查与评价类项目具有以下特点。

(1) 研究区域集中。研究区域包括了墨西哥湾、阿拉斯加州以及美国近海其他水合物赋存区。20 世纪 80 年代,通过沉积物样品首次确认墨西哥湾北部存在水合物。早期的估算表明墨西哥湾的水合物中赋存有 10 万亿~1 000 万亿 m³ 甲烷当量,因此该区域一直是美国水合物研发计划资源勘查与评价工作的重点^[37]。该区域的重点项目包括 2001 年至 2014 年由雪佛龙牵头实施的“墨西哥湾水合物联合工业”项目以及续作的 2014 年至 2025 年由德克萨斯大学奥斯汀分校牵头实施的“深水水合物表征和科学评估”项目。这两个项目是资源勘

查与评价类的旗舰项目,总经费共计9 410 万美元,占资源勘查与评价类总经费的79%,但不同的是“墨西哥湾水合物联合工业”项目的财政经费占比超过70%,而随后的“深水水合物表征和科学评估”项目的财政经费占比不足7%,也在一定程度上表明美国政府层面对水合物资源的投入力度趋缓。

(2)注重方法与设备的研发。在资源勘查与评价类项目中,共计有13个项目面向方法与设备的研发,以提高对水合物基础性质的认识。在计划初期,以研究三维地震方法、钻井工具和海底监测站为主,旨在表征含水合物沉积物的物理性质。此后的项目研究发现:地震与电阻率测井的结合能够更有效地确定和表征海洋水合物的赋存,尤其适用于勘探与似海底反射(bottom simulating reflector, BSR)特征不相关的热成因含水合物沉积物,也可用于长期监测水合物生产;海洋电磁法能够直接量化含水合物储层的分布、饱和度和总体积。

(3)机构间合作紧密。为更好地实现水合物研发计划的目标,除管理框架外,还通过机构间协议设立了机构间合作项目,以最大程度地发挥各参与联邦机构的知识与经验优势。其中最具代表性的是美国能源部与美国地质调查局的机构间协议,通过总计4个项目的持续研究,在计划初期通过采集墨西哥湾的地震资料和岩心样品,对该区域水合物资源情况进行了初步表征。此后利用地质、地球化学、地震、电学、地热和海底摄像数据掌握了墨西哥湾北部水合物赋存情况以及对钻探作业的潜在危害。最近,美国地质调查局的研究重点是阿拉斯加北坡和墨西哥湾已知含水合物储层的生产潜力评估。

2.2.2 生产技术类项目

生产技术类项目共计12个,主要目的是开发可实现含水合物储层经济生产的技术与设备(图3)。该类项目的数量虽然不多,但经费占比相对较高,表明单项经费投入巨大。目前在研项目1个,是由美国地质调查局承担的“阿拉斯加水合物生产现场试验:储层响应测试规划、作业和结果分析支持”,此项目只有能源部提供的18.2万美元支持,目的是为阿拉斯加水合物试采提供地质和地球物理技术支持。

生产技术类项目的主要研究区域为加拿大麦肯齐三角洲 Mallik 和阿拉斯加北坡。其中,于1997

年设立的两个项目参与了加拿大 Mallik 试采,成功钻探了3口井,在进行裸眼测井并获取岩心后,进行了水合物的降压+热刺激法试采。

阿拉斯加北坡一直是生产技术类项目的重点研究区域,最早于1997年设立项目,评估了阿拉斯加北坡的水合物资源潜力,后于2001年对 Milne Point 地层单元的具体含水合物储层进行了表征,2007年钻探的“Mt. Elbert”测试井证实了上述储层表征方法的有效性。在阿拉斯加北坡先后部署了2次水合物试采工作,分别是2012年的 CO_2/CH_4 置换产气试验,以及2024年7月刚刚完成的计划一年期(实际10个多月)的降压法产气试验。

2.2.3 室内实验与数值模拟类项目

室内实验与数值模拟研究类项目共计34个,主要目的是支持资源勘查与评价类和生产技术类项目的实施,加强基础科学研究。尽管该类项目的数量较多,但经费占比较小(图3)。

这类项目中的近一半由美国能源部下属的国家实验室承担,包括劳伦斯伯克利国家实验室、太平洋西北国家实验室和劳伦斯利弗莫尔国家实验室等。主要工作内容包括:①数值模拟(产气量预测、固体生产模拟、盆地与水合物系统建模、实验室测试验证);②开发热-水-化学-力学(THCM)模拟程序(全耦合开源水合物系统模拟器);③开展基础科学实验室研究(水文学/地质力学特性、孔隙尺度观测和建模、含水合物沉积物的基本认识);④开发保压岩心分析工具;⑤支持现场产气测试(关井程序、完井方法);⑥开展资源量和供需经济分析;⑦促进机构间和国际合作(模拟程序对比、岩心分析)^[38]。

2.2.4 环境效应类项目

环境效应类项目共计19个,主要目标是研究水合物对气候、生态的影响,以及评估资源勘查与试采的潜在地质环境风险。

按照时间和研究重点的变化趋势可以把项目分为以下几类:①最早期的研究是针对墨西哥湾的海底观测项目,以获取水合物对环境的影响,并以海底观测站的形式加强对水合物的基础认识;②2005年设立了1个环境类项目,通过2002年夏季在白令海东南部 Umnak 高原采集的沉积物,研究了水合物与气候之间的联系;③从2006年开始,美国能源部开始设立水合物与全球环境的项目。2008年春天,美国能源部/美国地质调查局研讨会

开始关注气候-水合物研究,因此,2008年美国能源部资助了11个气候类项目;④2011年,美国能源部/美国地质调查局研讨会提升了气候-水合物研究的优先级,2012年以后美国能源部资助了10个项目,最后一个设立于2019年,此后无此类项目设立。

3 美国水合物研发计划主要成果

3.1 资源勘查与评价

3.1.1 墨西哥湾

如前文所述,墨西哥湾是美国水合物资源勘查与评价的重点研究区域,除了以三维地震调查为主要手段的水合物资源表征外,主要开展了4个钻探航次。其中,“墨西哥湾水合物联合工业”项目分别于2005年和2009年实施了2个航次,利用测井和取心方法证实了用于圈定高饱和度含水合物砂质储层的勘探方法的有效性。“深水水合物表征和科学评估”项目分别于2017年和2023年实施了2个航次,利用经改进的两种型号的球阀保压取心工具成功获取了高质量含水合物岩心样品^[39]。

3.1.2 资源评价

早在1995年美国地质调查局就完成了对美国水合物资源情况的详细评估。2008年,美国矿产管理局启动了一项工作,以评估整个外大陆架的水合物资源潜力,包括阿拉斯加州、大西洋、墨西哥湾和太平洋边缘,目标是评估原地、技术可采和经济可采的水合物资源情况。同年,美国矿产管理局发布了对墨西哥湾水合物资源量的评估结果,即607万亿 m^3 甲烷当量,是美国当时天然气探明储量的100倍^[40-41]。2012年,美国海洋能源管理局评价墨西哥湾最有利的储层中水合物的原地资源量超过了170万亿 m^3 ,且在美国的太平洋和大西洋外大陆架也赋存有大量水合物资源^[42]。

2002年,美国地质调查局和美国土地管理局签订了一项协议,以评估阿拉斯加北部水合物资源量。2013年国家油气评估项目结题报告中提出,2008年美国地质调查局评价阿拉斯加北部水合物中未发现的平均技术可采资源量为2.4万亿 m^3 甲烷当量^[43]。2019年,美国地质调查局发布了《阿拉斯加北坡未探明水合物资源量评估报告》,利用新获取的三维地震资料以及对含水合物储层特性的更深入认识,对阿拉斯加北坡冻土带赋存的潜在水合物

矿床进行了更准确的资源量评估,结果表明该区域的平均技术可采资源量为1.5万亿 m^3 甲烷当量^[44]。

3.2 陆域试采

美国除参与加拿大Malik的陆域试采外,在本国阿拉斯加北坡共实施了两次陆域试采,第一次采用的主要是 CO_2-CH_4 置换法,第二次采用的是降压法。

3.2.1 阿拉斯加北坡 CO_2-CH_4 置换法试采

2011年和2012年,在阿拉斯加北坡Igñik Sikumi进行了 CO_2-CH_4 置换方法的现场试采,测试了此种产气技术的可行性。现场试采包括了2011年的钻井和地球物理测井以及2012年的试采。试采注入含有化学示踪剂的 CO_2 和 N_2 混合气体,在低于水合物稳定性阈值的压力下生产30 d。Igñik Sikumi井证实了普拉德霍湾地层单元的Eileen水合物藏中存在多个含水合物的砂质储层,目标层段中的水合物占储层孔隙体积的80%。该现场项目是同类项目中的第一个并取得了成功,获取了丰富的钻井、测井和试采数据,可以用于指导未来的生产工作^[45-46]。

3.2.2 阿拉斯加北坡长期降压法试采

截至目前,世界各国已经实施了十几次水合物试采,但都是中短期试采,没有实施过长期试采,且存在很多如实际生产与预测结果不符等技术问题尚未得到解决。为解决技术问题达到长期稳定生产以最终实现产业化,2014年,日本与美国签署了备忘录,合作开展长期陆域水合物试采。长期陆域水合物试采项目的主要目标是,利用降压技术对一个或多个含水合物砂质储层进行现场试采。最终在选定的阿拉斯加北坡的普拉德霍湾单元西部的Eileen水合物藏内确定了拟进行试采的场地。利用Hydrate-01地层测试井确定了B单元和D单元层段内存在高饱和度含水合物储层。2023年9月开始降压,并于10月24日(当地时间)确认B单元产气,2024年7月30日完成试采^[47-48]。在为期10个多月的试采期间,项目除确定了与长期产气行为相关的问题及获取了相关数据外,还将产出的甲烷气体作为试采场地内发电机等测试设施的燃料使用。

4 结论与认识

本文通过对美国2000年启动实施的国家级水

合物研发计划的分析研究,认为该计划有效发挥了美国能源部、美国地质调查局等联邦机构的组织协调能力和国家实验室和高校的科研引导能力、以及企业的工程实施能力,在基础科学研究、资源勘查评价、陆域试采等方面处于全球领先地位。具体来说,美国国家水合物研发计划具有“研究区域集中、重视技术方法与设备配套研发、强化室内实验与数值模拟研究、联邦机构间合作紧密”等典型发展特征。此外,也注意到受能源政策影响美国的水合物研发投入呈下滑趋势。

(1)美国历任政府能源政策对水合物研究所获支持力度至关重要。如克林顿政府从能源可持续供给的角度通过《甲烷水合物研发法案》授权美国能源部启动国家级水合物计划。尽管美国能源部水合物咨询委员会多次呼吁提高水合物研发经费,但由于拜登政府从特朗普政府高度重视化石能源开发利用向高度重视清洁能源发展急速转变,美国对水合物的研发投入和关注程度明显降低。

(2)组织结构有助发挥联邦机构组织协调能力和国家实验室和高校科研引导能力、企业工程实施能力。根据《甲烷水合物研发法案》要求及随后计划实施需要,参与的联邦机构包括美国国家科学基金会、美国国家海洋与大气管理局、美国海军研究实验室、美国海洋能源管理局、美国地质调查局、美国土地管理局等。为了计划的具体部署实施,美国能源部授权国家能源技术实验室牵头组织,由各领域专家组成的咨询委员会负责规划编制,由所涉联邦机构的代表组成的技术协调小组负责机构间合作。

(3)工作部署涵盖水合物资源勘查开发主要领域,在基础科学研究、资源勘查评价、陆域试采等方面处于领先地位。据不完全统计,美国水合物研发计划截至2023年共投入资金近3.1亿美元,其中40%来自项目匹配的外部资金。围绕资源勘查评价、生产技术研发、室内试验与数值模拟、环境效应4个方面共设立项目98个,但近年呈明显下降趋势。鉴于资金投入的有限性,美国的水合物资源勘查与试验性开发工作以墨西哥湾海域和阿拉斯加北坡两个传统油气产区为重点研究区域,在资源勘查与评价、储层表征研究、产气试验测试等方面取得了重要认识和进展。

(4)美国水合物研发工作由热趋冷值得思考。美国作为最早关注水合物资源作用及最早设立国

家级水合物研发计划的少数几个国家之一,为水合物引起全球关注发挥了极为重要的作用。但也应注意到,美国历届政府能源政策的变化、碳中和背景下以化石能源为主向以非化石能源为主的转变,使得水合物在其未来能源结构中的地位显著下滑。与美国不同,我国面临更为严峻的能源资源安全保障问题,且成功实施了两轮海域水合物试采,因此从能源资源储备的角度应继续加强水合物资源勘查和有利目标区优选工作以及加快生产体系构建,为具备水合物产业化开发能力奠定坚实基础。

参考文献(References):

- [1] 魏晓莎. 石油危机后美国能源政策制定的政治经济学研究[D]. 长春:吉林大学,2013:1-106.
Wei X S. The Political Economics of the Making of American Energy Policy after the Oil Crisis[D]. Changchun: Jilin University, 2013:1-106.
- [2] 乐欢. 美国能源政策研究[D]. 武汉:武汉大学,2014:1-149.
Yue H. A Study on US Energy Policies[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014:1-149.
- [3] 张炜,邵明娟,田黔宁,等. 日本海域天然气水合物研发进展及启示[M]. 北京:地质出版社,2018:1-173.
Zhang W, Shao M J, Tian Q N, et al. Progress and Insights in the Research and Development of Gas Hydrates in Japanese Sea Areas[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2018:1-173.
- [4] U. S. Department of Energy Office of Fossil Energy. A strategy for methane hydrates research & development[EB/OL]. (1998-08) [2024-08-30]. https://sites.science.oregonstate.edu/~hetheriw/energy/topics/doc/fuels/fossil/methane_hydrate/strategy_for_methane_hydrates_development_doe_1998.pdf.
- [5] 薛宇择,张明源. 美国能源政策的转变与国际能源安全[J]. 中外能源,2020,25(8):9-15.
Xue Y Z, Zhang M Y. Shift of US energy policies and international energy security[J]. Sino-Global Energy, 2020, 25(8):9-15.
- [6] 汪制邦,刘满平. 美国能源政策转变对全球能源市场影响及我国对策[J]. 价格理论与实践,2023(7):24-29.
Wang Z B, Liu M P. The influence of US energy policy transformation on global energy market and china's countermeasures[J]. Price: Theory & Practice, 2023(7):24-29.
- [7] Congress. Methane hydrate research and development act of 2000[EB/OL]. (2000-05-02) [2024-08-30]. <https://www.congress.gov/106/plaws/pub1193/PLAW-106publ193.pdf>.
- [8] 白玉. 克林顿新经济政策探析[D]. 重庆:西南大学,2013:1-35.
Bai Y. The Evaluation of the Clinton Administration's New Economy[D]. Chongqing: Southwest University, 2013:1-35.
- [9] National Research Council. Charting the future of methane hydrate research in the United States[EB/OL]. (2004) [2024-08-30]. http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=11094.

- [10] Congress. Energy policy act of 2005[EB/OL]. (2005-08-08) [2024-08-30]. <https://www.congress.gov/109/plaws/publ58/PLAW-109publ58.pdf>.
- [11] 孔祥永. 论奥巴马政府的新能源政策[J]. 世界经济与政治论坛, 2011(5): 28-41.
Kong X Y. On the Obama Administration's new energy policy[J]. Forum of World Economics & Politics, 2011(5): 28-41.
- [12] Guliyev F. Trump's "America first" energy policy, contingency and the reconfiguration of the global energy order[J]. Energy Policy, 2020, 140: 111435.
- [13] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Future directions for the U. S. geological survey's energy resources program[EB/OL]. (2018-08) [2024-08-30]. <https://nap.nationalacademies.org/resource/25141/Future%20Directions%20for%20the%20USGS%20Energy%20Resources%20Program%20Report%20Brief.pdf>.
- [14] 高霄, 周佳仪, 胡洁, 等. 碳中和目标下美国能源政策调整及其对中美博弈与合作的影响[J]. 中国石油大学学报: 社会科学版, 2023, 39(6): 57-63.
Gao X, Zhou J Y, Hu T, et al. US energy policy adjustments and their effects on Sino-US competition & cooperation under the carbon neutrality target[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Social Sciences), 2023, 39(6): 57-63.
- [15] The Technical Coordination Team of the National Methane Hydrate R&D Program. An interagency roadmap for methane hydrate research and development; 2015—2030[EB/OL]. (2013-05-24) [2024-08-30]. <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/06/f1/Roadmap%202013%20FAC%20Draft%205-28-13.pdf>.
- [16] The Methane Hydrate Advisory Committee. Gas hydrates research and development roadmap; 2020—2035[EB/OL]. (2019-07-26) [2024-08-30]. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/07/f65/Gas%20Hydrates%20Roadmap_MHAC.pdf.
- [17] Department of Energy. FY 2005 congressional budget request interior & related agencies[EB/OL]. (2004-02-02) [2024-08-30]. https://www.energy.gov/sites/default/files/FY05Volume7_0.pdf.
- [18] Department of Energy. FY 2006 statistical table by Appropriation[EB/OL]. (2005-02-02) [2024-08-30]. <https://www.energy.gov/sites/default/files/FY06apprstat.pdf>.
- [19] Department of Energy. FY 2007 Congressional Budget Request Fossil energy and other[EB/OL]. (2006-02-01) [2024-08-30]. <https://www.energy.gov/sites/default/files/FY07Volume7.pdf>.
- [20] Department of Energy. FY 2008 Congressional Budget Request Fossil energy and other[EB/OL]. (2007-02-01) [2024-08-30]. <https://www.energy.gov/sites/default/files/FY08Volume7.pdf>.
- [21] Department of Energy. FY 2009 Congressional Budget Request[EB/OL]. (2008-02-01) [2024-08-30]. <https://www.energy.gov/sites/default/files/FY09Volume7.pdf>.
- [22] Department of Energy. FY 2010 Congressional Budget Request[EB/OL]. (2009-02-01) [2024-08-30]. <https://www.energy.gov/sites/default/files/FY10Volume7.pdf>.
- [23] Department of Energy. FY 2011 Congressional Budget Request[EB/OL]. (2010-02-01) [2024-08-30]. https://www.energy.gov/sites/default/files/2013/05/f0/FY11Volume3_a.pdf.
- [24] Department of Energy. FY 2013 Congressional Budget Request[EB/OL]. (2012-01-20) [2024-08-30]. https://www.energy.gov/sites/default/files/FY13Volume3_0.pdf.
- [25] Department of Energy. FY 2014 Congressional Budget Request[EB/OL]. (2013-04-11) [2024-08-30]. https://www.energy.gov/sites/default/files/2013/04/f0/Volume3_1.pdf.
- [26] Department of Energy. FY 2015 Congressional Budget Request[EB/OL]. (2014-04-04) [2024-08-30]. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2014/04/f14/Volume%203.pdf>.
- [27] Department of Energy. FY 2016 Congressional Budget Request[EB/OL]. (2015-02-02) [2024-08-30]. https://www.energy.gov/sites/default/files/2015/02/f19/FY2016BudgetVolume3_7.pdf.
- [28] Department of Energy. FY 2017 Congressional Budget Request[EB/OL]. (2016-02-09) [2024-08-30]. https://www.energy.gov/sites/default/files/2016/02/f29/FY2017BudgetVolume3_2.pdf.
- [29] Department of Energy. FY 2018 Congressional Budget Request[EB/OL]. (2017-05-23) [2024-08-30]. https://www.energy.gov/sites/default/files/2017/05/f34/FY2018BudgetVolume3_0.pdf.
- [30] Department of Energy. FY 2019 Congressional Budget Request Volume3 part 1[EB/OL]. (2018-02-15) [2024-08-30]. https://www.energy.gov/sites/default/files/2018/03/f49/DOE-FY2019-Budget-Volume-3-Part-1_0.pdf.
- [31] Department of Energy. FY 2020 Congressional Budget Request[EB/OL]. (2019-03-11) [2024-08-30]. https://www.energy.gov/sites/default/files/2019/04/f61/doe-fy2020-budget-volume-3-part-1_0.pdf.
- [32] Department of Energy. FY 2021 Congressional Budget Request[EB/OL]. (2020-02-15) [2024-08-30]. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2020/04/f73/doe-fy2021-budget-volume-3-part-2.pdf>.
- [33] Department of Energy. FY 2022 Congressional Budget Request[EB/OL]. (2021-05-28) [2024-08-30]. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-06/doe-fy2022-budget-volume-3.2-v3.pdf>.
- [34] Department of Energy. FY 2024 Congressional Budget Request fossil energy and carbon management (FECM)[EB/OL]. (2023-03-13) [2024-08-30]. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2023-05/doe-fy-2024-budget-vol-4-fecm-v2.pdf>.
- [35] Ciferno J. FE methane hydrate research program[G]. 2016 Methane Hydrate Advisory Committee Meeting. Washington, DC, 2016: 1-10.
- [36] Department of Energy. Oil and gas project summaries completed | netl.doe.gov[EB/OL]. [2024-08-01]. https://www.netl.doe.gov/oil-gas/oil-and-gas-project-summaries?tid=34&field_project_type_value=Methane+Hydrates.
- [37] Collett T S, Bahk J J, Frye M, et al. Historical methane hydrate project review[R]. USA: Consortium for Ocean Leadership, 2013: 1-110.

- [38] Seol Y. Doe national labs – gas hydrate field work proposals[G]. 2019 Methane Hydrate Advisory Committee Meeting. Houston, TX, 2019;1 – 28.
- [39] DOE Office of Fossil Energy and Carbon Management. Doe successfully completed a gulf of Mexico gas hydrates characterization expedition on walker ridge[EB/OL]. (2024 – 01 – 18) [2024 – 08 – 01]. <https://www.energy.gov/fecm/articles/doe-successfully-completed-gulf-mexico-gas-hydrates-characterization-expedition>.
- [40] Frye M, Grace J, Hunt J, et al. MMS releases preliminary results of gulf of Mexico in – place natural gas hydrate assessment[J]. *Fire in the Ice*, 2008, 8(2):1 – 5.
- [41] Frye M. Preliminary evaluation of in – place gas hydrate resources; Gulf of Mexico outer continental shelf[R]. USA; U. S. Department of the Interior Minerals Management Service Resource Evaluation Division, 2008;1 – 94.
- [42] U. S. Geological Survey Alaska Gas Hydrate Assessment Team. National Assessment of Oil and Gas Project – Geologic assessment of undiscovered gas hydrate resources on the North Slope, Alaska[R]. USA; U. S. Geological Survey, 2013;1 – 100.
- [43] Capitanio L, Ciferno J, Ciferno R. Methane hydrate science and technology; A 2017 update[R]. USA; U. S. Department of Energy, 2017;1 – 36.
- [44] Central Energy Resources Science Center. Assessment of gas hydrate resources in the North Slope of Alaska, 2018 [EB/OL]. (2019 – 11 – 29) [2024 – 08 – 01]. <https://www.usgs.gov/centers/central-energy-resources-science-center/science/assessment-gas-hydrate-resources-north-0>.
- [45] Stoffa J. NETL methane hydrate R&D program PROGRAM HIGHLIGHTS 2000 – 2020[R]. USA; DOE National Energy Technology Laboratory, 2020;1 – 29.
- [46] 张炜, 刘伟, 谢黎. 天然气水合物开采技术——CO₂ – CH₄ 置换法最新研究进展[J]. *中外能源*, 2014, 19(4):23 – 27. Zhang W, Liu W, Xie L. Latest advance in CO₂ – CH₄ displacement technology for producing natural gas hydrate[J]. *Sino – Global Energy*, 2014, 19(4):23 – 27.
- [47] 邵明娟, 王平康, 吴庐山, 等. 日本海域天然气水合物试采结果对比分析[J]. *海洋地质前沿*, 2022, 38(12):8 – 15. Shao M J, Wang P K, Wu L S, et al. A comparative analysis of offshore gas hydrates production test in Japan[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2022, 38(12):8 – 15.
- [48] Alaska North Slope; establishing a long – term production test site [EB/OL]. [2024 – 08 – 01]. <https://netl.doe.gov/oil-gas/hydrates/AK-North-Slope>.

History and progress of the methane hydrate research and development program in the United States

SHAO Mingjuan^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2}, WANG Haihua^{1,2}, YAO Shuqing^{1,2}, SUN Zhanhao^{1,2}

(1. *Geoscience Documentation Center, China Geological Survey, Beijing 100083, China*; 2. *National Geological Library of China, Beijing 100083, China*)

Abstract: The United States established a national level hydrate research and development program in 2000, which has achieved fruitful results in various fields for more than 20 years, and the world's first long – term on-shore pilot production was completed on July 30, 2024. This article introduces the impact of the United States' energy policy on the deployment of hydrate research and development work, and summarizes the organizational structure and funding investment of the hydrate research and development program in the United States. Ninety – eight projects under the hydrate research and development program were sorted out, and these projects were classified and analyzed according to resource exploration and evaluation, production technology, laboratory and simulation research, and environmental effects fields. So the development trend of the hydrate research and development program in the United States were clarified and the highlights of the program's achievements were summarized. The analysis suggests that the hydrate research and development program in the United States is well – organized, and the respective strengths of government agencies, universities, research institutions, and private enterprises are effectively utilized. And the whole deployment is orderly, and the development of basic scientific research, resource exploration and evaluation, and pilot production mutually promoted each other. The research and development of hydrates has gradually cooled down in recent years due to the energy policies influence. The results of the stud could provide information references and lessons for China to improve its hydrate industrial development capability.

Keywords: the United States; methane hydrate; research and development program; energy policy; pilot

(责任编辑: 常艳)