

刘子琪, 孙治雷, 张现荣, 等. 美国天然气水合物调查研究历程概览及思考[J]. 海洋地质前沿, 2025, 41(5): 1-13.

LIU Ziqi, SUN Zhilei, ZHANG Xianrong, et al. Overview and consideration on the progress of natural gas hydrate investigation in the United States[J]. Marine Geology Frontiers, 2025, 41(5): 1-13.

美国天然气水合物调查研究历程概览及思考

刘子琪^{1,2,3}, 孙治雷^{2,3}, 张现荣^{2,3*}, 张喜林^{2,3}, 李世兴^{2,3}, 孙运宝^{2,3}, 李鑫海^{2,3}, 吕泰衡^{2,3}, 周渝程^{2,3}

(1 中国地质科学院, 北京 100037; 2 自然资源部天然气水合物重点实验室, 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237;

3 青岛海洋科技中心海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237)

摘要:天然气水合物作为一种高效清洁的新能源, 分布范围广, 资源储量潜力大, 具有巨大的经济价值和重要的战略意义, 越来越受到世界各国的关注。美国是率先建立国家级水合物研发计划的国家之一, 已较系统地开展了海洋天然气水合物调查研究。通过政府机构、科研院校和私人机构间的跨机构合作, 美国在资源勘探、基础理论研究、资源量评估、开采、环境评价等方面取得了一系列显著进展。本文系统归纳了美国国家天然气水合物研究历程、研发计划及其进展, 详细解析了美国墨西哥湾、水合物脊和阿拉斯加北坡 3 个最为典型区域的天然气水合物勘查开发进展及其原因, 以期为中国天然气水合物的研究工作提供参考。

关键词:天然气水合物; 历史沿革; 勘探开发; 产业化; 启示; 美国

中图分类号: P618.13; P736

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2023.253

0 引言

天然气水合物(简称“水合物”), 是天然气和水在低温、高压条件下形成的一种固态类冰状可燃物质^[1], 又称“可燃冰”。早在 1778 年, 英国科学家 PRIESTLEY 就发现了二氧化碳水合物, 但当时未进一步证明; 1810 年, 英国科学家 HUMPHREYD 在实验室配制并测定出了氯化物水合物^[2]。自此以后, 对水合物的研究拉开序幕, 并渐成为世界能源的关注焦点^[3]。

目前, 调查发现全球直接或间接存在水合物的地区多达 230 处(图 1), 但总体分布不均, 主要受地质构造控制, 约 99% 分布在各大洋陆缘地区, 仅有

少部分分布在陆地冻土区^[4]。据早期估算, 全球水合物的总资源量约为 2 万万亿 m^3 , 总有机碳储量相当于全球已探明矿产燃料(煤炭、石油和天然气等)的 2 倍^[5], 随着近期调查研究的深入, 总量估计有所下降, 但全球(不包括南极洲)中的甲烷水合物中天然气的含量仍可达到 $1\,800 \times 10^9 \text{ t}$ 碳(约 $2\,400 \times 10^9 \text{ t}$ 甲烷)^[6]; 加之水合物具有分布广、埋藏浅、储量大、高热值的显著特点, 被认为是 21 世纪的替代能源。

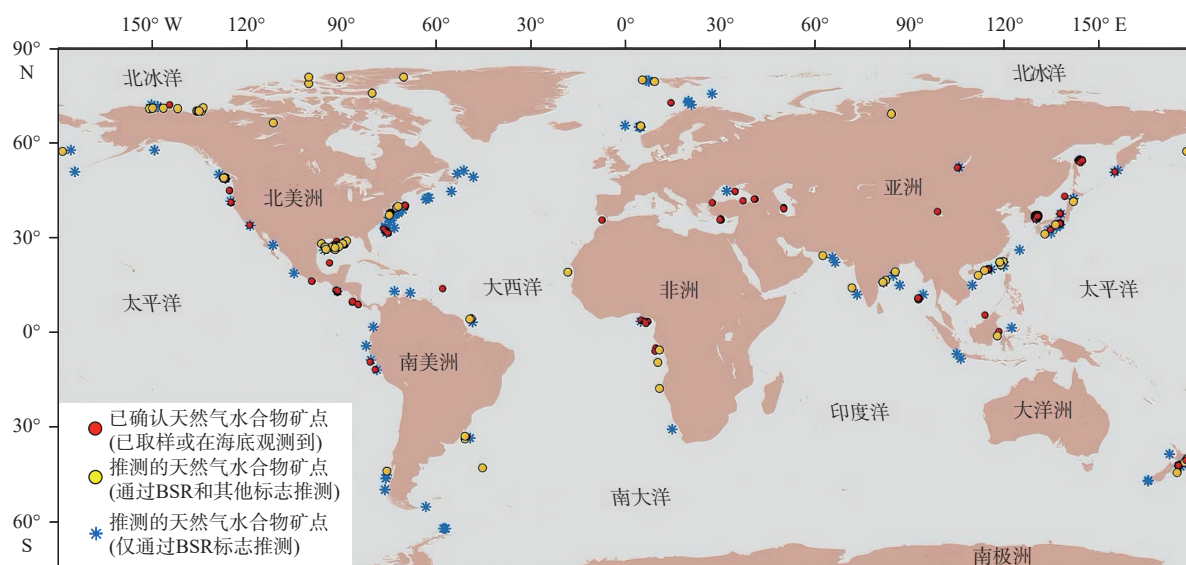
由于天然气水合物资源潜力巨大, 兼具经济开发价值和战略意义, 除了发达国家如美国、日本、韩国、德国、挪威等继续开展天然气水合物研发外, 一些发展中国家如中国、印度等天然气水合物的研发发展迅猛^[7-9]。迄今为止, 全球已经有超过 100 口探井专门用于天然气水合物研究和勘探, 有 30 多个国家和地区在进行天然气水合物的研究与调查勘探, 已实施或正在开展的水合物调查研究与勘查区域已遍及全球大部分地区^[6,10](图 1)。其中, 美国是世界上开展海洋水合物调查研究最早的国家之一, 早在 1970 年, 就通过深海钻探计划 DSDP 10 航次首次在墨西哥湾获取含天然气水合物岩芯^[11], 之后先后实施东海岸布莱克海台大洋钻探计划(ODP)、西海岸水合物脊 ODP、墨西哥湾工业联合项目、西

收稿日期: 2023-11-02

资助项目: 国家自然科学基金“海洋甲烷拦截带对冷泉流体的消耗研究: 来自南海东沙海域的观测与研究”(42176057), “西太平洋流固界面物质循环及其演变集成研究”(92358301); 山东省自然科学基金“冲绳海槽冷泉-热液流体解碳源/汇效应及对深海碳循环的影响”(ZR2021MD049); 中国地质调查局项目“CSHC 中北部海洋区域地质调查”(DD20230402)

第一作者: 刘子琪(2002—), 女, 在读硕士, 主要从事海洋地球化学方面的研究工作. E-mail: 1272516538@qq.com

* 通讯作者: 张现荣(1986—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事海洋地球化学方面的研究工作. E-mail: sdzxr@126.com

图 1 全球天然气水合物分布^[6]Fig.1 Global distribution of natural gas hydrate^[6]

海岸天然气水合物综合大洋钻探计划(IODP)以及阿拉斯加北坡水合物开采试验项目。近几十年来水合物计划的开展和实施,使得美国在基础理论研究、资源勘探与评估、开采技术等方面进展显著。本文系统归纳美国水合物研究历史沿革、研发计划及进展,为中国水合物的研究及产业化战略实施提供借鉴。

1 美国水合物研究历史沿革

在首次海洋中发现天然气水合物之后,1974年美国通过深海钻探航次在布莱克海台获得海洋天然气水合物样品,并证实其分布与“似海底反射层(Bottom Simulating Reflector, BSR)”的关系^[12]。1981年,美国制订了甲烷水合物10年研究计划,1982—1992年,美国能源部(DOE)投入了超过800万美元建立对天然甲烷水合物埋藏分布和物理/化学性质的基本认识,并逐渐向短期勘探和生产研发领域扩展。但由于传统能源价格低廉和能源部内部政策,该项目到期后被终止。总的来说,该项目对于将水合物从单纯的科学研究转变为潜在能源项目以及建立水合物全球进一步发展框架意义重大^[13]。

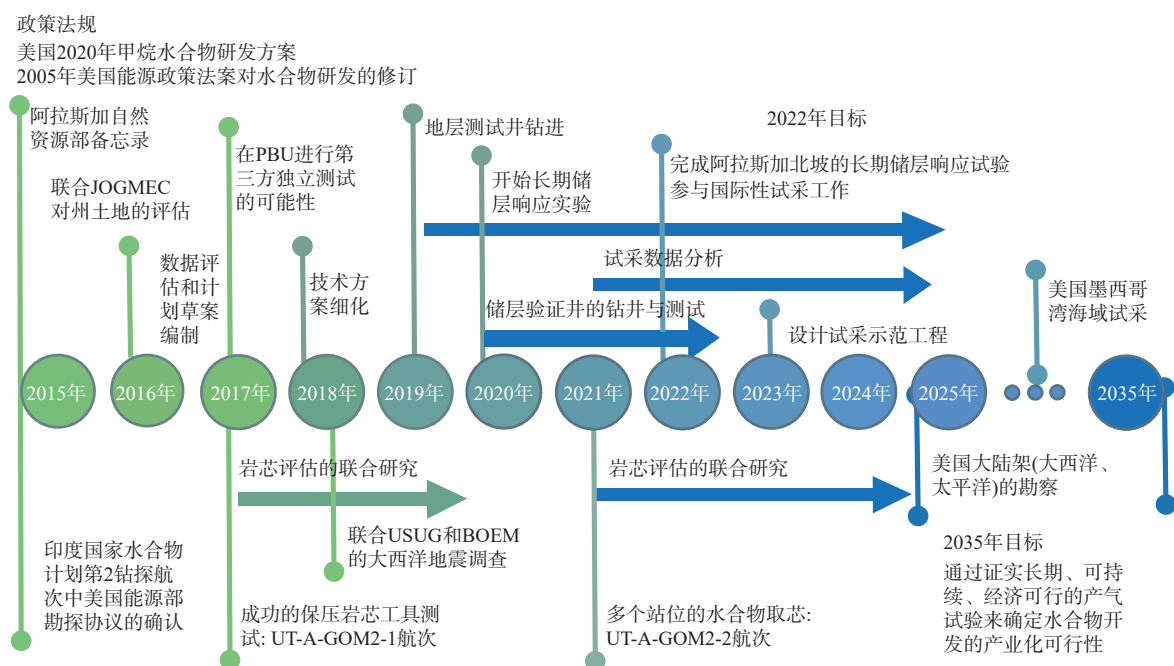
1995年,美国借助ODP计划在其东部海域布莱克海台实施了一系列深海钻探,对海洋天然气水合物系统的分布及地质过程的理解有了重大进展^[14]。1998年5月,美国参议院能源委员会一致通过了1418号议案“天然气水合物研究与资源开

发计划”,将天然气水合物资源作为国家发展的战略能源列入长远计划,该议案批准天然气水合物资源研究开发年投入经费2 000万美元,要求能源部制订统一的研究规划,组织国内科研单位进行联合研究^[15]。

从2000年起,美国启动国家级甲烷水合物研发计划,由美国能源部牵头组织,美国联邦机构、高等院校、国家实验室、工业界和国际参与者共同实施^[16]。在2001—2010年10年间,该计划年均投入超1 500万美元,主要在阿拉斯加北坡和墨西哥湾系统开展地质与地球物理调查、资源量评价以及钻探调查等^[17]。

2019年,美国甲烷水合物咨询委员会(MHAC)又提交了《美国国家天然气水合物研发计划2020—2035年路线图》报告(图2),指出了美国水合物研发计划的优先重点研究领域,并意识到长期稳定的资金支持对保持美国在全球天然气水合物研发领域的领导地位至关重要^[18]。

美国国家天然气水合物研发计划2020—2035年的优先研究领域包括:长期产气试验及技术可行性,生产数据支持商业可行性模拟,美国海域含天然气水合物储层质量评估,以及美国在全球天然气水合物技术领域领导地位的保持。因此,美国甲烷水合物咨询委员会认为如下几项工作内容至关重要:①在阿拉斯加北坡实施长期、全面的生产测试之后,需要进一步扩大储层响应实验;②通过钻探、取芯以及地球物理调查等手段对墨西哥湾储层特征进行精细表征;③开展美国近海水域(除墨西哥

图 2 美国 2019—2035 年天然气水合物路线图^[19]Fig.2 Gas hydrate roadmap of U.S. during 2019-2035^[19]

湾和阿拉斯加北坡之外)的水合物储层质量评估。但是与常规油气资源相比,水合物的开发依然面临技术、成本和环境等多方面的难题与挑战^[20]。

2 美国水合物研究进展

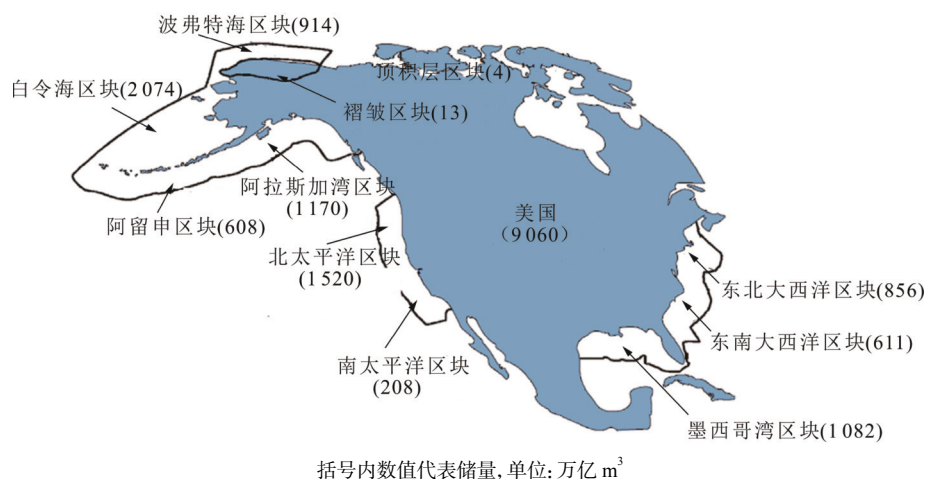
2.1 基础理论研究

1934 年,美国科学家率先发现天然气输气管道中的堵塞物为输气过程中形成的水合物^[21];1971 年,从地球物理角度提出了在地震剖面上识别 BSR 和空白反射带来预测水合物分布的理论^[22];TUCHOLK^[22]提出水合物层和稳定带(Hydrate Stability Zone)的概念,为水合物资源量计算提供了地质依据;KVENVOLDEN^[23]通过分解实验,得到 1 m³ 的甲烷水合物在室温下可释放出约 164 m³ 的甲烷和 0.8 m³ 的水。由此,改变了天然气水合物的定义,即甲烷为主的混合气体和水分子形成的无定形聚合物,由此学术界开始大量使用“甲烷水合物”一词。整体来看,美国在水合物基础理论研究方面长期占据主导地位,虽然相关论文数量在 2010 年被中国超过,但在地质学、地球物理、地球化学等基础性问题研究以及科研影响力方面仍具有相对优势^[24]。

2.2 资源量评估

1995 年,美国针对其周边海域及北美陆域多年

冻土带的研究调查表明,美国甲烷水合物区天然气的储量约为 9 060 万亿 m³,主要的水合物分布区有 5 个,分别为阿拉斯加海域、太平洋、墨西哥湾、大西洋、阿拉斯加陆域(图 3),其储量比分别为 52.6%、19.1%、11.9%、16.2%、0.2%。随着勘探及评估技术的进步,资源量评估也渐进精准化,2012 年,美国公布本土外大陆架的天然气水合物中蕴藏有约 1 450 万亿 m³ 的天然气,其中,墨西哥湾砂岩储层中所赋存的高富集度水合物藏的天然气总量为 190 万亿 m³。据调研发现,美国较早时间就对天然气水合物资源量进行了估算,尤以墨西哥湾和阿拉斯加北坡的工作最为系统。例如,早在 20 世纪 80 年代,KRASON 等^[25]采用简单体积法大致估算了墨西哥湾中、西部水合物地质资源量为 0.2~255 万亿 m³;KLAUDA 和 SANDLER^[26]改进饱和度模型,考虑储层特征非均质性,认为墨西哥湾海域渗漏型水合物地质资源量可达 120 万亿 m³;2008 年,美国海洋能源管理局(BOEM)开发了水合物系统评价模型,基于蒙特卡洛算法估算墨西哥湾北部资源量为 315~975 万亿 m³^[27];2018 年,MAJUMDAR 和 COOK^[28]利用 800 余处石油工业测井资料和地震数据,采用网格化评价方法估算墨西哥湾北部水合物地质资源量为 37~78 万亿 m³;对于阿拉斯加北坡陆域天然气水合物,2008 年 11 月 USGS 发布的数据显示,该区未探明天然气技术可采资源量估算为 0.7~4.5 万亿 m³,平均资源量为 2.4 万亿 m³。

图3 美国天然气水合物储量分布^[29]Fig.3 Distribution of methane hydrate in the U.S. ^[29]

2.3 勘探开发

2.3.1 勘探阶段

20 世纪 60 年代, 美国在墨西哥湾及东部布莱克海台实施油气地震勘探时, 发现了似海底反射层(BSR)。1970 年, 在布莱克海台实施了 DSDP 钻探, 取芯过程中发现沉积物岩芯存在强烈的脱气作用, 但未意识到这些气泡的来源^[11]; 直到 1974 年, STOLL 等^[12]通过 DSDP 航次钻探获得实物, 并称之为“天然气水合物”, 由此开启了世界范围内的海洋水合物资源勘探热潮, 并长期占据了海洋天然气水合物勘探活动的领导者位置; 1979 年, 美国在墨西哥湾实施 DSDP 航次, 并取得了水合物岩芯^[30]; 1995 年, 在美国东海岸实施的布莱克海台 ODP164 航次钻探, 首次有计划地取得了天然气水合物样品^[31]; 2002 年在西海岸实施的水合物脊 ODP 204 航次钻探, 成功取得了实物样品和数据^[32]; 2005 年, 美国墨西哥湾天然气水合物联合工业项目(Joint Industry Project, JIP)在墨西哥湾实施了第 1 个航次^[33]; 2009 年, 实施 JIP 第 2 个航次, 钻探了 7 口井, 以确定墨西哥湾砂质储层的水合物资源潜力^[34]; 2018 年, 开展了中大西洋资源成像试验项目(MATRIX), 获取 2 000 多千米的多道地震数据, 以调查纽约州和北卡罗来纳州之间的大西洋边缘的水合物资源分布特征^[35]。

在陆域极地冻土区, 美国的水合物勘探开发走在国际前列。2007 年, 在阿拉斯加北坡 Mount Elbert 区实施了科学钻探和井下产气试验, 获得了水合物赋存的地质控制因素特征, 高精度测井资料、长 427 ft 的含水合物储层岩芯, 以及地层测试数据^[36]。

与此同时, 在水合物保压取芯钻具、相关地质灾害等方面也开展了大量研究。综合 Mount Elbert 测试结果与地区现有油气生产井的测井数据, 分析认为, PBU L-Pad 地区的 Ignik Sikumi 为后续水合物产气试验的最佳地点。

2.3.2 开发阶段

经过了几十年的勘探, 科学家确定了美国水合物开发的有利区, 并于 2011 年进行阿拉斯加 Ignik Sikumi 现场试采井的钻探, 并对含水合物层段进行了测井测试。2012 年在阿拉斯加 Ignik Sikumi #1 井, 运用 $\text{CO}_2\text{-CH}_4$ 置换法成功地完成了水合物的第 1 次试采^[37]。在注入 $5\,950\,\text{m}^3$ 的 N_2/CO_2 之后, 该试采井连续产气 37 d, 产气率达到 $5\,000\,\text{m}^3/\text{d}$ 。在降压返排期间, 大部分注入到储层的 N_2 都得到了回收, 约 $1\,360\,\text{m}^3$ (约为注入总量的 50%) CO_2 滞留于储层中生成了水合物, 表明利用 $\text{N}_2/\text{CO}_2\text{-CH}_4$ 置换法生产水合物在技术层面具有可行性^[36]。

2015 年, 美国地质调查局(USGS)又在阿拉斯加进行了天然水合物试采, 完成站位选择、描述和试采作业; 2018 年开展了钻探以进行地层测试以确定长期试采的可行性^[38]; 2019 年 1 月, DOE、日本石油天然气与金属矿物资源机构(JOGMEC)与 USGS 等机构等合作, 成功锁定了 2 套富砂质含水合物储层, 成为水合物未来试采的潜在目标靶区^[39]。

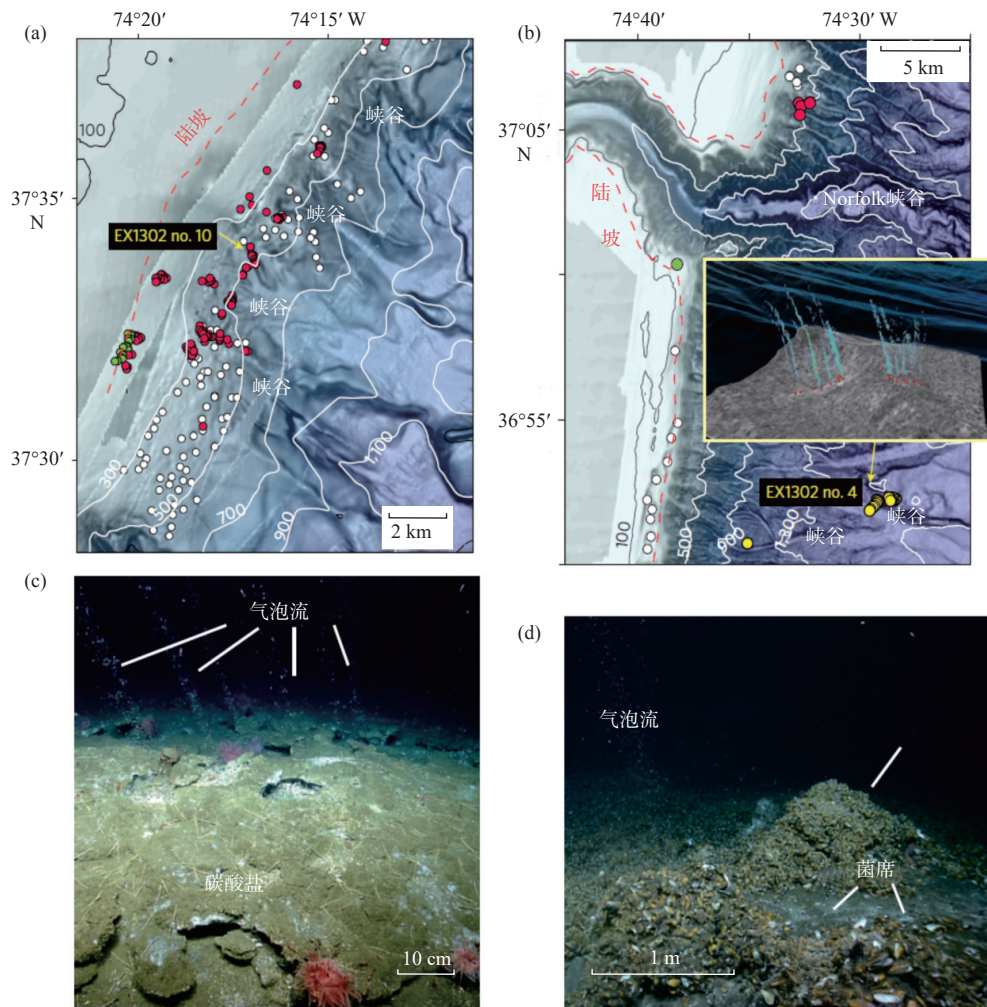
2.4 环境效应

与中国和日本相比, 美国在水合物的环境效应调查研究方面的工作具有“整体不系统、热点够深入”的突出特征。对于天然气水合物环境效应, 美国的调查研究水平一直处于前列^[39-41], 并且在天然

气水合物的环境效应研究水平和基础理论创新方面又获得了重要的成果。这主要体现在水合物系统的碳循环机理、极端生物群落的特征、海底地质灾害、水合物系统对气候的影响等热点科学问题的研究方面取得的重要成绩。如美国科学家 PAULL 等^[42]于 1983 年发现了海底与水合物有关的冷泉活动及相关的生物群落, 认为其为以甲烷、硫化氢等还原性物质为能量和物质基础的特殊生态群落。另外, 美国科学家关注气候变暖和天然气水合物系统之间的关系, DOE 下属的国家能源技术实验室 (NETL) 和跨机构伙伴在 21 世纪初已将水合物纳入到全球碳循环模型中予以研究以解决这个问题, DOE/NETL 还资助了旨在调查海洋和多年冻土水合物环境中的这一问题的现场项目, 包括阿拉斯加北坡以及美国大西洋、太平洋和墨西哥湾

边缘^[43]。

美国科学家 MACDONALD 等^[44]发现了海底裸露赋存的浅表层水合物, 并对其动态变化及附近的生物进行了相关的研究。SUESS 等^[45]最早用海底观测网, SKARKE 等^[46]利用阿尔文 (Alvin) 等先进潜器, 对于海洋水合物的动态变化机理、发生的生化反应取得了一系列全新的认识, 开创了水合物环境效应探测和评价的新局面。2017 年, 美国 USGS 和罗切斯特大学的研究者提出, 大洋中水合物系统对气候系统的影响有限, 没有证据表明水合物溶解释放的甲烷会对气候产生明显的影响^[6]; 同时, 美国密西西比州立大学还通过多波束后散射数据在大西洋边缘识别出数百个甲烷渗漏喷口 (图 4), 来追溯水体中的甲烷的来源、通量以及最终的归宿^[46]。



(a、b) 甲烷泄漏点 (红色) 和麻坑 (白色), 其中图 b 中插图显示约 1 400 m 处水体中的气泡羽流可视化影像, 黄色箭头指示照片拍摄地点;
(c、d) 遥控潜器拍摄的海底照片

图 4 美国中大西洋边缘发现的甲烷泄漏点和海底特征照片

Fig.4 Methane seep sites (red dots) and pits (white dots) at seafloor (a, b), showing bubble plumes (b) along the U.S. Mid-Atlantic margin and the photos (c, d)

3 主要调查区水合物的勘探开发进展

3.1 墨西哥湾

墨西哥湾盆地以盐底辟和新生代沉积充填为主要地质背景,是全球典型水合物分布区之一,数

十年来也对此区域水合物储层及气源等特征开展了一些系统调查研究(表 1)。墨西哥湾海底已有 50 多处取得了水合物样品,发育在水深 440~2 400 m 的海底,一般产于海底 2 m 以下的沉积层中,但也会经常出露于海底,如在 Bush Hill^[47-50]。截止目前,墨西哥湾是全球 I、II 和 H 型水合物均发育的唯一地区。

表 1 美国主要地区水合物特征^[51]

Table 1 Characteristics of gas hydrate of the study areas in the U.S.^[51]

研究区域	气源	运移通道	水合物饱和度	储层岩性	水合物产出状态	储层类型
墨西哥湾	热解气、生物气均有发现,以热解气为主	气烟囱、大尺度断层、裂缝	细粒沉积物中平均为10%,砂岩中平均可达80%	火山碎屑砂岩、浊积水道砂岩、砂岩夹泥岩等细粒沉积物	孔隙充填、裂缝充填、海底丘状体	海域砂质储集体、含裂缝细粒储集体、海底水合物丘状体
水合物脊	热解气、生物气均有发现,以生物气为主	断裂系统、气烟囱、高渗透性地层	约为45%	黏土质粉砂、粉砂质黏土等	浸染状、海底丘状体	海底水合物丘状体、非渗透性黏土质储集体
阿拉斯加北坡	热解气来自于深部;生物气来自于浅层;以混合气为主	大尺度断层	最高为75%,平均在60%以上	砂岩	孔隙充填	极地砂质储集层

自 20 世纪 80 年代以来,在该区域进行油气勘探过程中发现了微生物气源和热成因气源的水合物。2000—2005 年,墨西哥湾水合物主要关注浅表层部位,围绕墨西哥湾北部 Bush Hill 海底浅表“水合物丘”,开展了数据监测、钻探取样和实验分析,证实水合物形成和分解对海洋环境的影响^[52]。墨西哥湾北部是全球水合物资源调查最为充分的地

区,到目前为止,已经进行了约 45 万 km² 的三维地震调查,其中,BSR 的分布面积达到 4 450 km²,BSR 的类型明显分为 3 种:不连续型、连续型和羽毛型(图 5)^[53]。但通过钻探验证,半数以上的 BSR 并未对应水合物的富集^[54],而振幅相位反转却是更有力的指示标志^[55]。这些发现都为后来的水合物资源勘探提供了宝贵的经验借鉴。

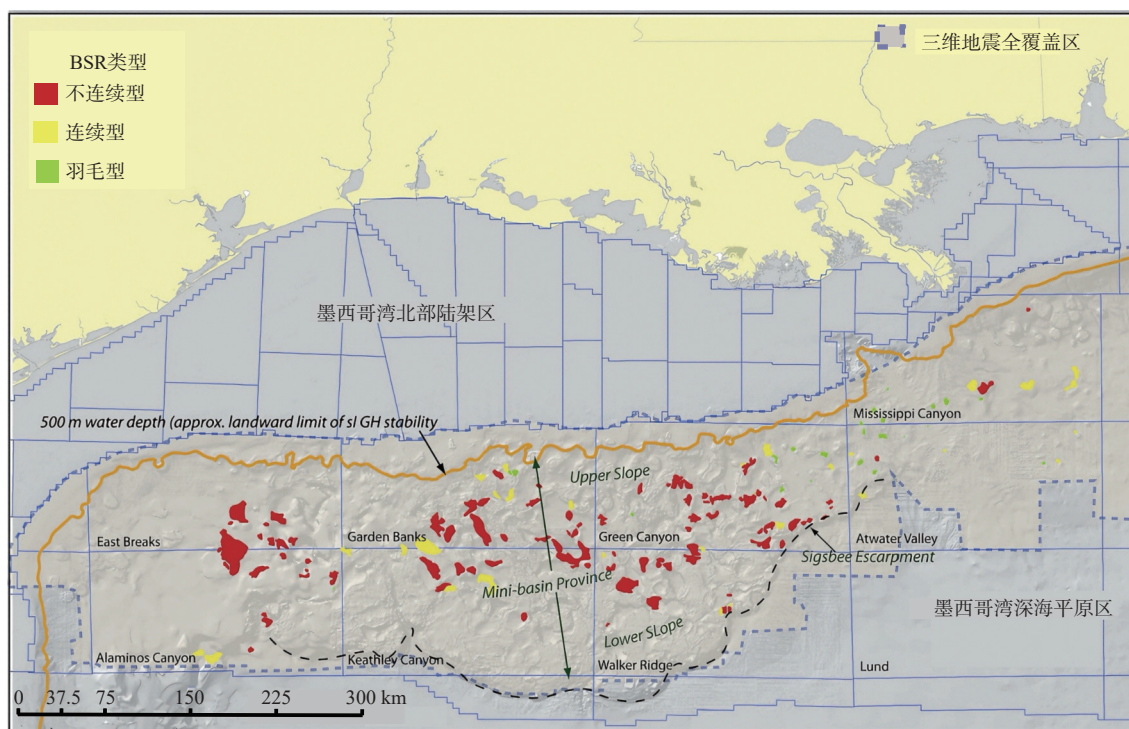


图 5 墨西哥湾北部 BSR 的类型及分布特征^[53]

Fig.5 Types and distribution of BSR in northern Gulf of Mexico^[53]

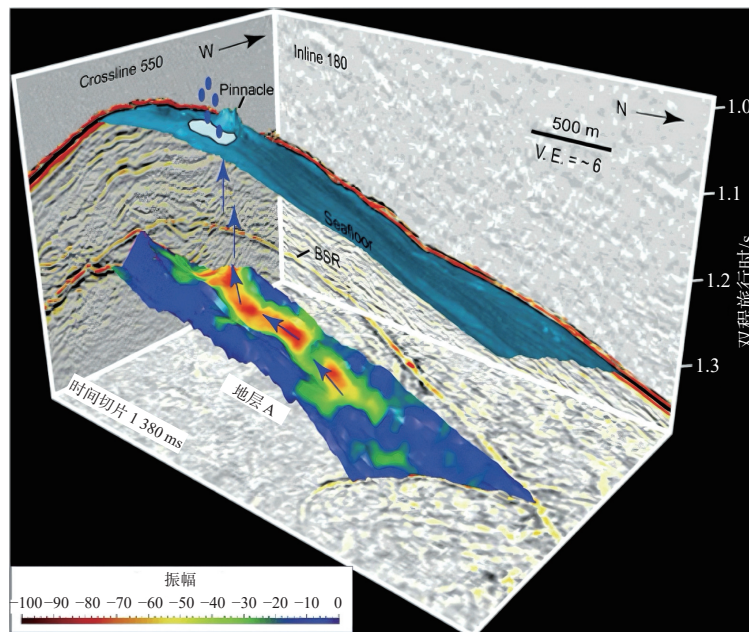
2005 年以来, 墨西哥湾水合物研究进入了勘探阶段, 由 DOE 联合雪佛龙等石油公司, 实施了两阶段的“联合工业计划”(Joint Industry Project, JIP), 两阶段共布置钻井 14 口, 钻获了大量的水合物样品, 特别是第 2 阶段在粗颗粒砂岩中获取了高饱和度的水合物实物样品, 证实了墨西哥湾海底相当一部分水合物赋存于砂岩层中, 其特点是厚度大、饱和度高, 属于适合开采的高质量资源级水合物。据初步估算, 其原位资源总量达 $31.1 \sim 90.6$ 万亿 m^3 , 仅在砂岩层中可开发利用的资源级水合物就高达 19 万亿 m^3 ^[56]。墨西哥湾储层特征研究的最终目的是准确评估天然气水合物的聚集程度和性质以及墨西哥湾含水合物储层的生产潜力。

3.2 水合物脊

水合物脊位于卡斯卡迪亚增生楔北端向海外延伸处, 是增生变形前缘的第 2 个逆冲隆起, 由浊积物和半远洋沉积物覆盖^[57-58], 在过去 40 年来, 一直是研究汇聚边缘环境下天然气水合物/游离气系统的焦点区域。全球发现的第 1 个汇聚边缘的冷

泉系统就在水合物脊^[59-60]。1992 年, 在 ODP146 航次中完成的 892 钻井就打到了水合物储层, 并对其进行了取样^[61]。2002 年, ODP204 航次在水合物脊南部又布置了 9 个站位, 以进一步调查该区的水合物, 发现该区在深部地层内的超高压驱动下, 可能在天然气水合物稳定带(GSHZ)内产生垂直裂缝, 使下部的气体得以运移到此带内, 从而在上部地层中形成高饱和度的水合物, 并向发育于海底的喷口供应气体^[62-63]。

在水合物脊开展水合物调查工作主要目的有 3 个: ①确定 BSR 和水合物的关系; ②估算水合物中储存的甲烷量; ③调查水合物成藏过程和流体运移过程之间的关系^[64]。到目前为止, 在整个水合物脊已经系统开展了深潜器(阿尔文号)调查、两次大洋钻探、高精度地震调查(图 6)、可控源大地电磁调查^[65]、水声调查、基于遥控潜器和自治式潜器调查高精度海底扫测以及海底流体观测调查, 此外该区还被作为以美国海洋观测(OOI)网原位监测与水合物有关过程的重要节点。



海底浅蓝色斑块为气体喷口位置, 位于称为“顶峰”的碳酸盐烟卤东部; 箭头显示了气体沿地层 A 并垂直向上运移路径; 地层 A 上等值线图为 2008 年调查中测得的地震反射振幅, 其颜色表明了气体浓度, 最高振幅(最高气体浓度)为红色^[66]

图 6 水合物脊南部地层 A 和海底之间的喷口系统的三维透视图

Fig.6 3D view of the south Hydrate Ridge vent system between Horizon A and the seafloor

在水合物脊的调查成果对今后水合物的勘探和评价工作有着重要的指导意义。首先, 通过在该区的实践, 探索了一整套针对水合物资源量评价的新方法体系。如在 ODP204 航次, 开发了保压取样

仪来回收岩芯, 并应用红外扫描办法对岩芯进行了现场扫描^[67]; 在 ODP146 航次和 204 航次, 利用水合物离解而发生的孔隙水淡化特征对水合物饱和度进行了最佳约束。总之, 该区的工作表明, 利用

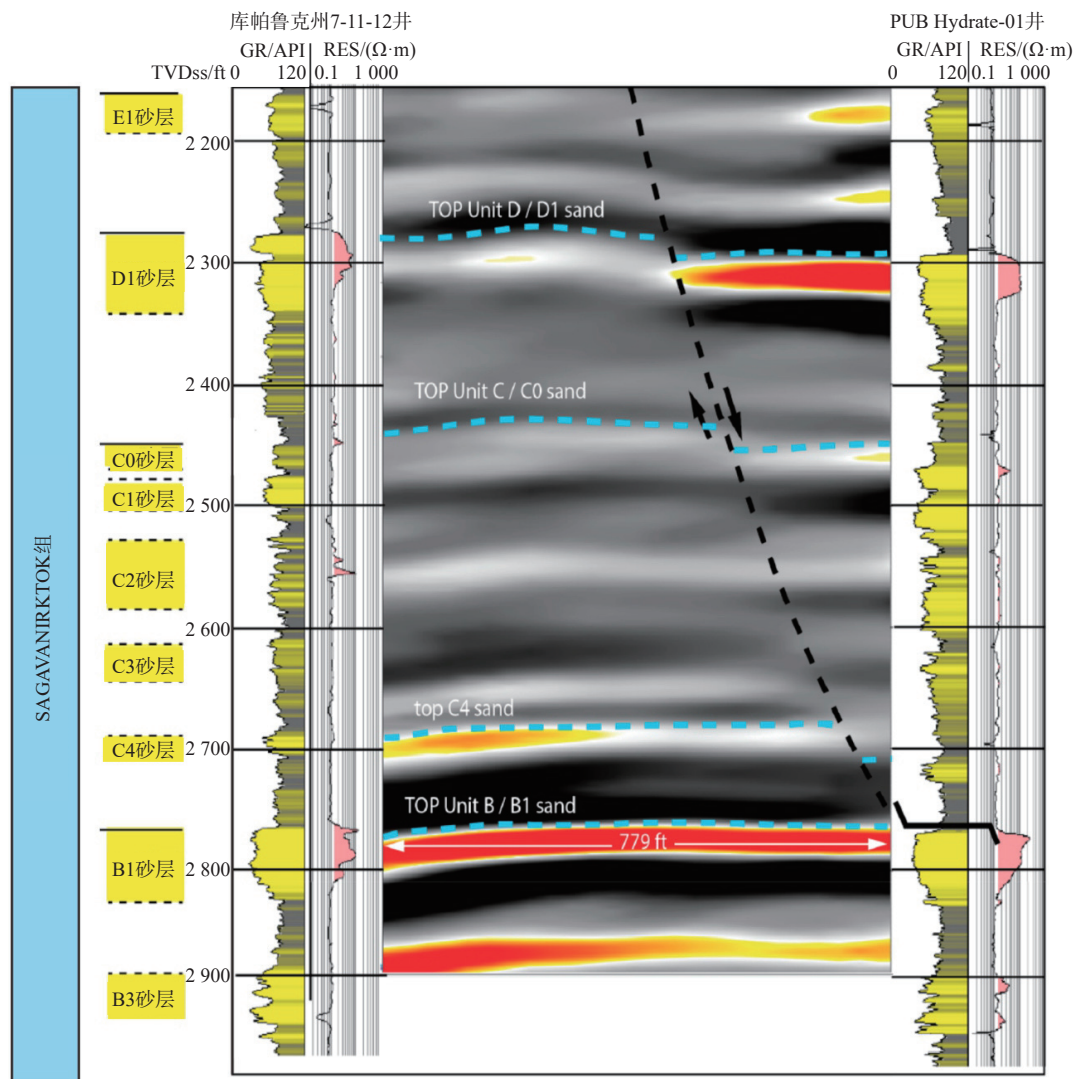
钻探结果对地球物理指标进行校准是非常有必要的。其次,多种手段调查发现,活跃的气体喷口伴随着该区最高饱和的水合物矿体,它们可能是游离气沿着渗透层向上迁移聚集到闭合背斜中的结果,但这种水合物的分布范围有限,总量也有限^[66]。该发现对正确评价渗漏型水合物的资源量提供了重要参考依据。

3.3 北极阿拉斯加地区

北极地区的天然气水合物研究已经有 50 多年历史,其中美国阿拉斯加地区、加拿大马更些三角洲和俄罗斯西伯利亚地区是目前研究程度最高的 3 个区域^[68]。20 世纪 90 年代,在阿拉斯加地区为期 5 年的调查结果显示,其北部的普罗德霍湾和库

帕鲁克地区、北部陆坡区及其海域都蕴藏丰富的水合物。该地区水合物稳定带的上界约为 210~240 m,其中,在普罗德霍湾水合物稳定带厚度最大超过了 1 000 m,平均深度范围为 210~950 m^[69]。据美国地质调查局发布的最新评估结果,阿拉斯加北坡含有 1.5 万亿 m³ 的天然气水合物资源^[70]。

1998 年,由美国地质调查局、加拿大地质调查局以及日本国家石油、天然气与金属公司联合在该区实施水合物研究井钻探与试采计划。2003—2004 年,DOE 资助开展了 Hotice-1 项目,实施多年冻土区水合物的室内和现场试验研究。2012 年,DOE 和 JOGMEC 以及康菲石油共同合作,首次在普罗德霍湾地区实施 CO₂-CH₄ 置换水合物试验,成功向水合物饱和的砂岩层注入约 6 000 m³ 的 CO₂



两口地层测试井分别为库帕鲁克州的 7-11-12 井和 PBU(普拉德霍湾西部单元)Hydrate-01 井。GR-伽马测井数据, RES-电阻率测井数据, TVDss-海底之下总垂直深度(1ft=0.304 8 m)^[71]

图 7 从阿拉斯加北坡 PBU 单元获得的三维分布式声学系统 (DAS) 垂直地震剖面数据

Fig.7 Data obtained from the vertical seismic profile of the three-dimensional DAS in PBU Unit, Alaska North Slope

和 N_2 混合气体(分别为 23% 和 77%), 累计生产天然气量约 $3 \times 10^4 m^3$, 该项技术有望对利用天然气水合物储层固定二氧化碳提供新思路。

美国科学家及其合作伙伴当前致力于在阿拉斯加北坡进行的长期(至少 1 年)天然气水合物生产性试采, 以便更好地了解天然气水合物能源的资源潜力^[71]。从 2015 年初, 来自 DOE、JOGMEC 和 USGS 的科学家确定了在阿拉斯加北坡普拉德霍湾单元(PBU)开展生产性试采的地点, 并制定了运营钻探计划, 使所需的科学试验能够以不会破坏该地区正在进行的行业相关现场作业的方式进行^[72]。2019 年底, 在 PBU 单元成功完成了名为 Hydrate-01 地层测试井钻探, 以便确认该地点是否适合未来开展长期的生产性试采。通过该井的钻探, 证实了存在高饱和的含天然气水合物储层^[71,73]。获得了系统的随钻测井数据, 部署了分布式声学系统和分布式温度系统, 并开展了 DAS 垂直地震剖面调查, 以获得试采的关键参数(图 7)。这项工作基本证明了从选定的水合物矿床生产天然气的技术可行性。

4 启示

天然气水合物作为一种规模巨大且高效的新型清洁能源, 长期以来受到各国政府和企业的关注。纵观美国国家水合物研究经验及研发计划, 为中国新能源开发提供了多维度的经验与启示。

(1)多手段融合、多学科交叉的水合物勘探的综合方法技术。美国水合物分布广泛, 主动大陆边缘、被动大陆边缘以及海底泥火山等特殊地质构造区域类型均有分布。然而, 各研究区水合物具有典型的成藏模式和赋存特征, 如美国东海岸的被动大陆边缘 BSR 与水合物富集并不一致, 而振幅相位反转是更有力的指示标志。又如大洋钻探探明的超高压作用下高通量流体驱动的高饱和度水合物储存的水合物脊, 以及阿拉斯加北坡的大尺度断层背景下的高饱和度水合物开采新方法运用, 这些发现和探索表明, 不同的研究背景下需采取针对性的勘探方法。这些成功的案例也推动了水合物勘探研究的进行, 为后来的水合物资源勘探及开采提供了宝贵的经验借鉴。

(2)水合物产业化开发仍面临巨大的技术挑战。美国最早开始海域天然气水合物的钻探, 最早开始以海底观测网和水下潜器进行水合物调查, 最早开

始极地冻土区水合物试采, 最早实施 CO_2-CH_4 置换水合物试验, 可以说在很长一段时期, 美国的技术一度代表着世界海洋水合物勘探开发领域的巅峰。即便如此, 在水合物产业化的技术体系建立方面仍举步维艰。一方面是政治经济形势的限制, 一方面是技术体系本身存在的困难所致, 因此水合物产业化绝非一蹴而就的。虽然中国已经在海洋水合物试采方面获得了长足的提高, 创造了多项世界纪录, 但当前仍需在技术成熟度和开发成本等关键点上下功夫, 力争率先实现水合物产业化开发。

(3)广泛开展国际合作。美国之所以一段时间内引领天然气水合物发展, 其自身创新能力突出是一方面, 另外一方面是善于开展国际合作, 以此延伸自己的研究范围和领域影响力。美国早期以 DSDP、ODP 的航次开展水合物国际合作调查, 目前国际上开展的诸多水合物调查和试采活动, 美国更是渗透到方方面面, 比如多次参与加拿大马立克冻土区的水合物试采^[74], 以及印度国家天然气水合物计划第一航次(NGHP-01)等^[75]。美国在阿拉斯加开展的陆域水合物试采也邀请了 JOGMEC 参加。在整体投入不高的形势下, 仍属于水合物勘查开发领域非常活跃的国家, 和其善于开展广泛的国际合作的能力是分不开的。通过这些多种形式的国际合作, 美国始终能处于水合物产业化的前沿位置, 确保其掌握最新的动向和技术, 这值得我们学习和借鉴。中国应依托现有试采优势, 补足基础研究与长效政策的短板, 实现从技术突破到商业开发的跨越。

参考文献:

- [1] SLOAN E D. Fundamental principles and applications of natural gas hydrates[J]. *Nature*, 2003, 426(6964): 353-359.
- [2] DAVY H. On a combination of oxymuriatic gas and oxygene gas[J]. *Philosophical Transactions of the Royal society of London*, 1811, 101: 155-162.
- [3] HE J, YU L, YE C, et al. Parameter optimization of gravel packing sand control method for natural gas hydrate production[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, 153(2): 022009.
- [4] MCIVER R D. Gas hydrates[J]. *Long-term energy resources*, 1981: 713-726.
- [5] RUPPEL C D, KESSLER J D. The interaction of climate change and methane hydrates[J]. *Reviews of Geophysics*, 2016, 55(1): 126-168.
- [6] RUPPEL C D, WAITE W F. Grand challenge: timescales and processes of methane hydrate formation and breakdown, with

- application to geologic systems[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2020, 125(8): 1-43.
- [7] DAVIE M K, ZATSEPIN O Y, BUFFETT B A. Methane solubility in marine hydrate environments[J]. *Marine geology*, 2004, 203(1/2): 177-184.
- [8] 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. Comparative analysis of gas hydrate trial production results in Japan Sea area[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2022, 38(12): 8-15.
- [9] 张炜, 白凤龙, 邵明娟, 等. 日本海域天然气水合物试采进展及其对我国的启示 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2017, 37(5): 27-33.
- ZHANG W, BAI F L, SHAO M J, et al. Progress in gas hydrate trial production and its implications for China in Japan Sea area[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2017, 37(5): 27-33.
- [10] 欧芬兰, 于彦江, 寇贝贝, 等. 水合物藏的类型, 特点及开发方法探讨 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2022, 42(1): 194-213.
- OU F L, YU Y J, KOU B B, et al. Types, characteristics and development methods of gas hydrate reservoirs[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2022, 42(1): 194-213.
- [11] CLAYPOOL G E, PRESLEY B J, KAPLAN I R. Gas analyses in sediment samples from legs 10, 11, 13, 14, 15, 18 and 19[J]. In: *initial reports of the Deep Sea Drilling Project*, Washington DC: USGPO, 1973, 19: 879-884.
- [12] STOLL R D. Effect of gas hydrates in sediments. In: *Nature of Gases in Marine Sediments* (Ed. I. R. Kaplan)[M]. New York: Plenum Press, 1974: 235-248.
- [13] 张炜, 王淑玲. 美国天然气水合物研发进展及对中国的启示 [J]. *上海国土资源*, 2015, 36(2): 79-82.
- ZHANG W, WANG S L. Progress in gas hydrate research and development in the United States and its implications for China[J]. *Shanghai Land and Resources*, 2015, 36(2): 79-82.
- [14] WOOD W T, RUPPEL C. 26. Seismic and Thermal Investigations of the Blake Ridge Gas Hydrate Area: A Synthesis[M]// PAULL C K, MATSUMOTO R, WALLACE P J, et al. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results. College Station: Ocean Drilling Program*, 2000, 164: 253-264.
- [15] 孟弘. 青藏陆域“可燃冰”: 期待国家层面的推进 [N]. *经济参考报*, 2011-01-20.
- MENG H. Flammable Ice in the Qinghai Tibet Land Region: Looking Forward to National Level Promotion[N]. *Economic Information Daily*, 2011-01-20.
- [16] NRC. Charting the future of methane hydrate research in the United States. National research council report of the committee to review the activities authorized under the methane hydrate research and development act of 2000. Ocean studies board, board on earth sciences and resources, division on earth and life studies[R]. Washington: The National Academies Press, 2004: 192.
- [17] 张炜, 邵明娟. 国际天然气水合物勘查与试采势头未减 [N]. *中国矿业报*, 2017.
- ZHANG W, SHAO M J. Exploration and trial production of international gas hydrates remain active[N]. *China Mining News*, 2017.
- [18] 邵明娟, 张炜. 美国国家天然气水合物研发计划概述及启示 [J]. *地质论评*, 2020, 66(S1): 191-192.
- SHAO M J, ZHANG W. Overview of the U. S. National Gas Hydrate Research and Development Program and its implications[J]. *Geological Review*, 2020, 66(S1): 191-192.
- [19] MHAC-DOE. Gas hydrates research and development roadmap: 2020-2035, July 2019. *Gas Hydrates Roadmap_MHAC.pdf* (energy.gov).
- [20] HAMMERSCHMIDT E. Formation of gas hydrates in natural gas transmission lines[J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1934, 26(8): 851-855.
- [21] STOLL R D, BRYAN G M. Physical properties of sediments containing South China Sea[J]. *Progress in Geophysics*, 2012, 27(3): 1008-1019.
- [22] TUCHOLKE B E. Sedimentation processes and acoustic stratigraphy in the Bellingshausen Basin[J]. *Marine Geology*, 1977, 25(1/3): 209-230.
- [23] KVENVOLDEN K A. Methane hydrate: a major reservoir of carbon in the shallow geosphere?[J]. *Chemical Geology*, 1988, 71(1/3): 41-51.
- [24] 景民昌, 张芹, 唐弟官, 等. 中美天然气水合物研究对比 [J]. *当代化工*, 2019, 48(5): 1093-1098, 1102.
- JING M C, ZHANG Q, TANG D G, et al. Comparison of gas hydrate research between China and the United States[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2019, 48(5): 1093-1098, 1102.
- [25] KRASON J, FINLEY P, RUDLOFF B. Geological evolution and analysis of confirmed or suspected gas hydrate localities. Volume 3. Basin analysis, formation and stability of gas hydrates in the Western Gulf of Mexico[R]. Denver: Geoexplorers International, Inc., 1985.
- [26] KLAUDA J B, SANDLER S I. Predictions of gas hydrate phase equilibria and amounts in natural sediment porous media[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20(5): 459-470.
- [27] FRYE M. Preliminary evaluation of in-place gas hydrate resources: Gulf of Mexico outer continental shelf[R]. U.S.: Department of the Interior Minerals Management Service, 2008.
- [28] MAJUMDAR U, COOK A E. The volume of gas hydrate-bound gas in the northern Gulf of Mexico[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2018, 19(11): 4313-4328.
- [29] LU S M. A global survey of gas hydrate development and reserves: specifically in the marine field[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, 41: 884-900.
- [30] GUERIN G, GOLDBERG D, MELTSEER A. Characterization of in situ elastic properties of gas hydrate-bearing sediments on the Blake Ridge[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1999, 104(B8): 17781-17795.
- [31] TRÉHU A M, BOHRMANN G, RACK F R, et al. Proceedings of the ocean drilling program, initial reports, volume 204[R].

- College Station: Ocean Drilling Program, 2003.
- [32] RUPPEL C, BOSWELL R, JONES E. Scientific results from Gulf of Mexico gas hydrates Joint Industry Project Leg 1 drilling: introduction and overview[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2008, 25(9): 819-829.
- [33] BOSWELL R, COLLETT T, MCCONNELL D, et al. Joint Industry Project Leg II discovers rich gas hydrate accumulations in sand reservoirs in the Gulf of Mexico[J]. *Natural Gas & Oil*, 2009, 304: 285-4541.
- [34] RUPPEL C D, MILLER N C, BALDWIN W E, et al. New seismic constraints on the distribution of methane hydrate on the US Mid-Atlantic Margin[C]. American Geophysical Union, Fall Meeting, 2018: OS54A-04.
- [35] COLLETT T S. Gas hydrate production testing-knowledge gained[C]//Proceedings of the Offshore Technology Conference. Houston: OTC, 2019.
- [36] BOSWELL R. Ignik Sikumi gas hydrate field trial completed[J]. *Natural Gas & Oil*, 2012, 304: 285-4541.
- [37] TAMAKI M, FUJIMOTO A, BOSWELL R, et al. Geological reservoir characterization of a gas hydrate prospect associated with the Hydrate-01 stratigraphic test well, Alaska North Slope[J]. *Energy & Fuels*, 2022, 36(15): 8128-8149.
- [38] FUJIMOTO A, LIM T, TAMAKI M, et al. DAS 3DVSP survey at Stratigraphic Test Well (Hydrate-01)[C]//Proceedings of the 14th SEGJ International Symposium. Tokyo: Society of Exploration Geophysicists and Society of Exploration Geophysicists of Japan, 2021: 19-22.
- [39] ARATA N, NAGAKUBO S, YAMAMOTO K, et al. Environmental impact assessment studies on Japan's methane hydrate R&D Program[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2011). Edinburgh, 2011: 1-8.
- [40] LIU L, RYU B J, SUN Z, et al. Monitoring and research on environmental impacts related to marine natural gas hydrates: review and future perspective[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019, 65: 82-107.
- [41] 魏合龙, 孙治雷, 王利波, 等. 天然气水合物系统的环境效应[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(1): 1-13.
- WEI H L, SUN Z L, WANG L B, et al. Environmental effects of gas hydrate systems[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(1): 1-13.
- [42] PAULL C K, HECKER B, COMMEAU R, et al. Biological communities at the Florida Escarpment resemble hydrothermal vent taxa[J]. *Science*, 1984, 226(4677): 965-967.
- [43] HANCOCK S, BOSWELL R, COLLETT T. Development of deepwater natural gas hydrates[C]. Houston: Offshore Technology Conference, 2019: D031S035R004.
- [44] MACDONALD I R, GUINASSO JR N L, SASSEN R, et al. Gas hydrate that breaches the sea floor on the continental slope of the Gulf of Mexico[J]. *Geology*, 1994, 22: 699-702.
- [45] SUESS E, TORRES M E, BOHRMANN G, et al. Gas hydrate destabilization: enhanced dewatering, benthic material turnover and large methane plumes at the Cascadia convergent margin[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 170(1/2): 1-15.
- [46] SKARKE A, RUPPEL C, KODIS M, et al. Widespread methane leakage from the sea floor on the northern US Atlantic margin[J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7(9): 657-661.
- [47] SASSEN R, MACDONALD I R. Evidence of structure H hydrate, Gulf of Mexico continental slope[J]. *Organic Geochemistry*, 1994, 22(6): 1029-1032.
- [48] SASSEN R, JOYE S, SWEET S T, et al. Thermogenic gas hydrates and hydrocarbon gases in complex chemosynthetic communities, Gulf of Mexico continental slope[J]. *Organic Geochemistry*, 1999, 30(7): 485-497.
- [49] SASSEN R, SWEET S T, DEFREITAS D A, et al. Exclusion of 2-methylbutane (isopentane) during crystallization of structure II gas hydrate in sea-floor sediment, Gulf of Mexico - ScienceDirect[J]. *Organic Geochemistry*, 2000, 31(11): 1257-1262.
- [50] MACDONALD I R, GUINASSO N L, SASSEN R, et al. Gas hydrate that breaches the sea floor on the continental slope of the Gulf of Mexico[J]. *Geology*, 1994, 22(8): 699-702.
- [51] 程聪, 姜涛, 匡增桂, 等. 天然气水合物系统特征及其对我国水合物勘查的启示[J]. *地质科技情报*, 2019, 38(4): 30-40.
- CHENG C, JIANG T, KUANG Z G, et al. Characteristics of gas hydrate systems and their implications for hydrate exploration in China[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2019, 38(4): 30-40.
- [52] KSTNER M, CLAYPOOL G, ROBERTSON G. Geochemical constraints on the origin of the pore fluids and gas hydrate distribution at Atwater Valley and Keathley Canyon, northern Gulf of Mexico[J]. *Marine Petroleum Geology*, 2008, 25: 860-872.
- [53] SHEDD W, BOSWELL R, FRYE M, et al. Occurrence and nature of "bottom simulating reflectors" in the northern Gulf of Mexico[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 34(1): 31-40.
- [54] MAJUMDAR U, COOK A E, SHEDD W, et al. The connection between natural gas hydrate and bottom - simulating reflectors[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(13): 7044-7051.
- [55] PORTNOV A, SANTRA M, COOK A E, et al. The Jackalope gas hydrate system in the northeastern Gulf of Mexico[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 111: 261-278.
- [56] COLLETT T, BAHK J, BAKER R, et al. Methane hydrates in nature-current knowledge and challenges[J]. *Journal of Chemical & Engineering*, 2015, 60: 319-329.
- [57] MCNEILL L C, GOLDFINGER C, KULM L V D, et al. Tectonics of the Neogene Cascadia forearc basin: investigations of a deformed Late Miocene unconformity[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2000, 112(8): 1209-1224.
- [58] HEESCHEN K U, TRÉHU A M, COLLIER R W, et al. Distribution and height of methane bubble plumes on the Cascadia margin characterized by acoustic imaging[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(12): 1-4.
- [59] SUESS E, CARSON B, RITGER S D, et al. Biological communities at vent sites along the subduction zone off Oregon[J]. *Bulletin of the Biological Society of Washington*, 1985, 6: 475-

- 484.
- [60] KULM L D, SUESS E, MOORE J C, et al. Oregon subduction zone: venting, fauna, and carbonates[J]. *Science*, 1986, 231(4738): 561-566.
- [61] Shipboard Scientific Party. Site 892[M]// WESTBROOK G K, CARSON B, MUSGRAVE R J, et al. Proceeding ODP Initial Reports, 146(Pt. 1): College Station, TX(Ocean Drilling Program), 1994: 301-378.
- [62] TRÉHU A M, FLEMINGS P B, BANGS N L, et al. Feeding methane vents and gas hydrate deposits at south Hydrate Ridge[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(23): 1-4.
- [63] CRUTCHLEY G J, BERNDT C, GEIGER S, et al. Drivers of focused fluid flow and methane seepage at south Hydrate Ridge, offshore Oregon, USA[J]. *Geology*, 2013, 41(5): 551-554.
- [64] BANGS N L, JOHNSON J E, TRÉHU A M, et al. Hydrate Ridge: a gas hydrate system in a subduction zone setting[J]. *World Atlas of Submarine Gas Hydrates in Continental Margins*, 2022: 89-107.
- [65] WEITEMEYER K A, CONSTABLE S, TRÉHU A M. A marine electromagnetic survey to detect gas hydrate at Hydrate Ridge, Oregon[J]. *Geophysical Journal International*, 2011, 187(1): 45-62.
- [66] BANGS N L B, HORNBAACH M J, BERNDT C. The mechanics of intermittent methane venting at South Hydrate Ridge inferred from 4D seismic surveying[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 310(1/2): 105-112.
- [67] TRÉHU A M, LONG P E, TORRES M E, et al. Three-dimensional distribution of gas hydrate beneath southern Hydrate Ridge: constraints from ODP Leg 204[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 222(3/4): 845-862.
- [68] 杨楚鹏, 刘杰, 杨睿, 等. 北极阿拉斯加北坡盆地天然气水合物成矿规律与资源潜力 [J]. *极地研究*, 2019, 31(3): 309-321.
- YANG C P, LIU J, YANG R, et al. Metallogenic regularity and resource potential of gas hydrates in the North Slope Basin of Arctic Alaska[J]. *Polar Research*, 2019, 31(3): 309-321.
- [69] COLLETT T S. Natural gas production from Arctic gas hydrates, the future of energy gases[J]. *USGS Professional Paper*, 1993, 1570: 299-312.
- [70] COLLETT T S, BOSWELL R, ZYRIANOVA M V. Alaska North Slope terrestrial gas hydrate systems: insights from scientific drilling[J]. *World Atlas of Submarine Gas Hydrates in Continental Margins*, 2022: 195-206.
- [71] BOSWELL R, COLLETT T S, YAMAMOTO K, et al. Scientific results of the Hydrate-01 Stratigraphic Test Well Program, western Prudhoe Bay Unit, Alaska North Slope[J]. *Energy & Fuels*, 2022, 36(10): 5167-5184.
- [72] COLLETT T S, ZYRIANOVA M V, OKINAKA N, et al. Planning and operations of the Hydrate 01 Stratigraphic Test Well, Prudhoe Bay Unit, Alaska North Slope[J]. *Energy & Fuels*, 2022, 36(6): 3016-3039.
- [73] COLLETT T S, LEE M W, AGENA W F, et al. Permafrost-associated natural gas hydrate occurrences on the Alaska North Slope[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(2): 279-294.
- [74] 左汝强, 李艺. 加拿大 Mallik 陆域永冻带天然气水合物成功试采回顾 [J]. *探矿工程: 岩土钻掘工程*, 2017, 44(8): 1-12.
- ZUO R Q, LI Y. Review on successful trial production of gas hydrate in Mallik land permafrost zone, Canada[J]. *Exploration Engineering: Geotechnical Drilling Engineering*, 2017, 44(8): 1-12.
- [75] COLLETT T S, BOSWELL R, COCHRAN J R, et al. Geologic implications of gas hydrates in the offshore of India: results of the National Gas Hydrate Program Expedition 01[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 58: 1-2.

Overview and consideration on the progress of natural gas hydrate investigation in the United States

LIU Ziqi^{1,2,3}, SUN Zhilei^{2,3}, ZHANG Xianrong^{2,3*}, ZHANG Xilin^{2,3}, LI Shixing^{2,3},
SUN Yunbao^{2,3}, LI Xinhai^{2,3}, LYU Taiheng^{2,3}, ZHOU Yucheng^{2,3}

(1 Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 Key Laboratory of Gas Hydrate of Ministry of Natural Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China; 3 Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China)

Abstract: Natural gas hydrate, a kind of efficient and clean new energy, is widely distributed and has large reserves, great economic value, and important strategic significance. It has attracted more and more attention in the world. Among them, the United States is the country with the most systematic investigation and research on natural gas hydrates, and is one of the first countries to establish a national hydrate research and development plan. Through inter-institutional collaboration among government agencies, research institutions, and private sectors, the United States has made a series of remarkable progress in the resource exploration, basic theoretical research, resource assessment, exploitation, and environmental assessment. In this paper, we systematically summarized the history, research and development plan, and progress of national gas hydrate research in the United States, analyzed the progress of gas hydrate exploration and development in the three most typical areas of the United States' Gulf of Mexico, the Hydrate Ridge, and North Slope of Alaska in detail, and considered the reasons behind the success of the United States in this field. This paper is expected to provide useful references for the industrialization of natural gas hydrate in China.

Key words: gas hydrate; historical evolution; exploration and development; industrialization; revelation; the United States