

全球主要国家天然气水合物研究进展

萧惠中^{1,2}, 张振^{1,2}

(1. 中国地质调查局广州海洋地质调查局 广州 510075; 2. 自然资源部海底矿产资源重点实验室 广州 510075)

摘要: 天然气水合物是一种高效清洁的新能源, 分布广、规模大, 势必成为未来的主流能源。在当前能源紧缺和环境问题日益突出的影响下, 世界各国都对潜力巨大的天然气水合物产生了浓厚兴趣。文章对全球主要国家的天然气水合物研究进展进行阐述, 并提出: 对我国天然气水合物重点目标区加大研究力度; 加大海域和陆域天然气水合物的资源调查力度, 寻找更多可供试采的水合物矿区; 与国际接轨, 加强国际合作; 考虑经济问题, 以期实现低成本、高效率的开发模式; 把环境安全放在突出位置, 尽可能避免水合物开采带来的环境及地质灾害问题等建议。以期能为未来我国天然气水合物的勘查试采工作提供有益帮助。

关键词: 天然气水合物; 新能源; 研究进展; 勘探开发; 海洋

中图分类号: P744. 4; TE132. 1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005—9857(2021)01—0036—06

A Review on Gas Hydrates Research Progress of Global Main Countries

XIAO Huizhong^{1,2}, ZHANG Zhen^{1,2}

(1. Guangzhou Marine Geological Survey, CGS, Guangzhou 510075, China; 2. Key Laboratory of Marine Mineral Resources, MNR, Guangzhou 510075, China)

Abstract: Gas hydrates is a kind of efficient and clean new energy, which is widely distributed and large-scale, and is bound to be the mainstream energy in the future. Under the influence of the current energy shortage and increasingly prominent environmental problems, many countries have a strong interest in the gas hydrates with great potential. This paper described the gas hydrates research progress of global main countries, and proposed to strengthen the research on the key target areas of gas hydrates in China, to strengthen the investigation of gas hydrates resources in sea and land areas, to find more mining areas for trial production, to connect with international standards and strengthen international cooperation. Considering the economic problems, in order to realize the low-cost and high-efficiency development mode, putting the environmental safety in the prominent position and avoiding the environmental and geological disasters caused by hydrate exploitation as far as possible, so as to provide useful help for the exploration and trial production of gas hydrates in China in the future.

Keywords: Gas hydrates, New energy, Research progress, Exploration and exploitation, Sea

收稿日期: 2020-03-02; 修订日期: 2020-12-22
基金项目: 国家重点研发计划资助(2017YFC0307400); 中国地质调查局项目资助(DD20190582, DD20191009).
作者简介: 萧惠中, 工程师, 硕士, 研究方向为海洋地球物理调查及其技术与海洋矿产资源调查
通信作者: 张振, 工程师, 博士, 研究方向为海洋矿产资源调查与研究

0 引言

天然气水合物又被称作“可燃冰”或“固体瓦斯”和“汽冰”,是由以甲烷为主的烃类气体和水组成的晶体化合物,其作为一种高效清洁的新能源,引起了世界各国的关注。美国科学家 Kvenvolden^[1] 预测全球天然气水合物总资源量约为 $2.0 \times 10^{16} \text{ m}^3$, 大约是目前全球已知的包括煤炭、石油、天然气等在内的常规化石能源储量的2倍。天然气水合物广泛赋存于低温($0^\circ\text{C} \sim 10^\circ\text{C}$)高压(10MPa)的大陆斜坡、海洋深水环境以及大陆永久冻土带等区域,其中海域资源量占99%,陆地资源量仅占1%^[2-3]。

目前,全球范围内已发现的天然气水合物矿点230余处,其中约97%分布于海洋中,有通过钻孔取样直接确证的,也有通过物探、化探和地质研究等间接证据推断的。世界上海底天然气水合物已发现的主要分布区是大西洋海域的墨西哥湾、加勒比海、南美东部陆缘、非洲西部陆缘和美国东海岸外的布莱克海台等,西太平洋海域的白令海、鄂霍次克海、千岛海沟、冲绳海槽、日本海、四国海槽、中国南海海槽、苏拉威西海和新西兰北部海域等,东太平洋海域的中美洲海槽、加利福尼亚滨外和秘鲁海槽等,印度洋的阿曼海湾,南极的罗斯海和威德尔海,北极的巴伦支海和波弗特海,以及大陆内的黑海与里海等。

1 国外天然气水合物研究进展

最早对海洋天然气水合物进行钻探活动的是美国,随后日本也钻取到水合物样品。此后20余年间,美国、日本、印度、中国、俄罗斯、加拿大与韩国等国家先后都对海域水合物进行了钻探工作。目前对天然气水合物开发已进入试验开采阶段的有美国、日本、印度、韩国、中国、俄罗斯和加拿大等国家,已取得了突破性进展。

1.1 美国

1998年,美国地质调查局预测美国的原位天然气资源量约 $9.067 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[4], 主要分布在5个地区:阿拉斯加海域(52.6%)、太平洋(19.1%)、墨西哥湾(12.0%)、大西洋(16.1%)以及阿拉斯加陆域(0.2%)。

1995年美国在大西洋西部布莱克海台进行天然气水合物调查,首次证明了水合物广泛分布,并

肯定其具有商业开发价值,在此研究获得一系列成果的基础上,美国参议院1998年决定把天然气水合物作为国家发展的战略能源列入国家长远计划。近期美国对海域天然气水合物的研究工作主要集中于墨西哥湾,研究表明墨西哥湾西北部天然气总量约为 $(10 \sim 14) \times 10^{12} \text{ m}^3$, 几乎等于或略低于整个墨西哥湾的天然气水合物资源量^[5]。2005年和2009年美国分别完成了“墨西哥湾水合物联合工业计划”(JIP)第一航次和第二航次的钻探工作,均证实了墨西哥湾海底水合物的存在^[6-8],并评价了与水合物有关的地质灾害风险以及沉积层中水合物的资源潜力。2017年由美国地质调查局与多个高校组成的科研团队对墨西哥湾北部的Green峡谷955区块进行水合物钻探和取心工作,以测试不同配置的保压取心装置并获取了足够的样品用于全面开展一系列科学问题研究。

近年来,美国对水合物研究的投入有所减少,但依然重视基础科学研究以及重大国际水合物计划/项目的参与。如:计划开展墨西哥湾的多站位钻探与取心;与日本合作开展阿拉斯加长期陆上试采(计划为期数月至一年);全面参与印度的长期近海试采;完成与韩国的第二轮合作研究等。

1.2 日本

在日本海域的西南群岛海沟、南海海槽、房总半岛东部、千岛海沟、日本海东部边缘、靛鞑海槽和鄂霍次克海共分布有约44 000 km²的似海底反射层(Bottom Simulating Reflector, BSR)分布区^[9], 预估日本海域甲烷水合物储量约为 $(4.7 \sim 7.4) \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[10-12]。其中南海海槽是最有前景的天然气水合物分布区^[13-14], BSR分布面积最大,占总面积的80%~90%,甲烷储量约为 $(0.42 \sim 4.2) \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[15]。

日本天然气水合物研发计划(Methane Hydrate R&D Program, MH21)由日本经济产业省(METI)部署实施,共分为3个阶段^[16]。第一阶段(2001—2008年),这个阶段主要进行包括勘探技术、分解生成技术、生产技术和环境影响评价等工作的基础科学研究。2001—2002年进行2D和3D地震调查,2004年在南海海槽完成了3个区域16个

站位 32 个钻孔的钻探作业,识别出了 3 种不同类型的水合物,并明确了水合物赋存与 BSR 之间的相关性^[17]。这一阶段的显著成果是完成了日本海域甲烷水合物的资源量评价、开发并野外试验确定了天然气生产技术。

第二阶段(2009—2015 年),这一阶段的主要工作是开展一次陆上生产试验和两次海上生产试验。2013 年 3 月,在南海海槽东部海域用“地球”号勘探船进行了全球首次近海甲烷水合物试采,成功从海底甲烷水合物中分离出甲烷气体,采用降压法,实现连续 6 天产气 $12 \times 10^4 \text{ m}^3$ ^[18-19],因出砂事故被迫中断。2014 年 10 月,成立了日本甲烷水合物调查株式会社,以实现近海试采实施和信息共享为任务来实现甲烷水合物的商业化开发。

第三阶段(2016—2018 年),该阶段以完善商业化开发技术基础为目标,重点将实施第二次近海试采和长期陆上试采。2017 年 5 月和 6 月两次试采,均成功从海底富砂储层中实现产气,但分别由于出砂和冰封的原因导致停产^[20]。两次试采产量都未获得有效提高,表明生产技术还有待改进^[21]。

在水合物试采的同时,日本还特别重视勘查与资源量评价流程的建立、储层评价流程的建立、环境影响和经济领域的评价以及国际相关活动的参与等。

1.3 印度

印度天然气水合物预测资源量为 $1\ 894 \times 10^{12} \text{ m}^3$,主要分布于孟买(Bombay)近海、喀拉拉—康坎(Kerala-Konkan)近海、北阿拉伯海、南阿拉伯海、东部近海、北孟加拉湾和南孟加拉湾^[22],预测水合物资源潜力区 7 个^[23]。

1997 年,印度石油和天然气部(Ministry of Petroleum and Natural Gas, MOPNG)实施印度国家天然气水合物计划(National Gas Hydrates Programme, NGHP),并于 2006 年和 2015 年分别实施了 NGHP 第一航次(NGHP-01)和 NGHP 第二航次(NGHP-02)。2006 年,“JOIDES Resolution”号科学研究钻探船沿着 Konkan 西海岸、Krishna-Godavari 盆地、Mahanadi 与 Andaman 周边地区进行天然气水合物远景区调查^[24],共调查 21 个站位,在 Krishna-Go-

davari 盆地钻取块状水合物样品。2015 年,雇用日本的“地球”号科考船在印度东部海岸作业,优选出砂质储层中的高饱和度天然气水合物,在 Krishna-Godavari 盆地圈定了可供未来水合物试采考虑的理想站位,历经 5 个月的时间,该航次被认为是印度实施国家计划以来最全面的一次天然气水合物调查^[25]。印度计划在 2017—2018 年开展的试采工作(NGHP-03)目前尚未有相关报道。

1.4 韩国

韩国海域天然气水合物主要分布在其东部近海郁龙(Ulleung)盆地。1996 年,韩国启动了第一个天然气水合物项目。随后几年里,韩国在东部海域开展了基础地质研究、地球物理调查和试验等工作^[26],获取了大量岩心样品、2D 多道地震数据与多波束测深数据,为天然气水合物生产试验奠定了坚实的基础。

2005 年,韩国政府启动了为期 10 年的国家天然气水合物计划,主要开展地质与地球化学、地球物理、钻探和开发等方面的研究。2007 年和 2010 年对郁龙盆地分别实施了第一次和第二次天然气水合物钻探航次^[27-28],进行试采站位的选择以及盆地资源潜力的评价。第一次钻探的研究结果表明大陆坡位置的碎屑流、浊流或半深海沉积物为水合物适宜发育区,第二次钻探在第一次基础上发现郁龙盆地水合物的形成与分布主要受岩性和裂隙构造控制,为寻找水合物有利开发区提供了基础数据。2011—2014 年对天然气水合物储层特征、钻探资料以及试开发数据等进行了研究,形成了天然气水合物的开发技术方案。原计划于 2015 年在郁龙盆地进行的试采工作由于资金问题被推迟^[29],至今未安排。

1.5 其他国家

俄罗斯海域和陆域的天然气水合物资源丰富,但该国对水合物资源没有系统勘查,无法准确评估其产量及分布^[30],有一份调查显示海域天然气水合物储量为 $(3.8 \sim 81.0) \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[31],陆域水合物主要分布在雅库特地区和西伯利亚地区,储量为 $(10 \sim 50) \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。1970 年对西西伯利亚地区的麦索亚哈气田投入开发,是世界上第一个投入工业化开发

的可燃冰气田。在1972—2004年主要用降压法对麦索亚哈气田进行开采,从地下730m获取水合物样品,但由于为间歇性产气而最终宣告失败^[32]。

加拿大北极多年冻土带与众多大陆架的天然气水合物资源储量保守估计为 $(0.01 \sim 1) \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[9],主要分布在麦肯齐三角洲一波弗特海地区、北极群岛地区、大西洋边缘地区、太平洋边缘地区^[33]。加拿大分别在2002年、2007年和2008年对麦肯齐三角洲陆域进行了水合物试采^[34-35],产气持续时间为14天、12.5小时、6天,由于出砂而停产。

德国对天然气水合物的全球环境意义特别重视,长期致力于水合物稳定性的热动力研究。德国与俄罗斯、美国合作,分别在鄂霍次海以及卡斯凯迪亚消减带开展水合物调查。德国在2000年后推出一系列地球系统和地质研究计划,都包括对水合物的研究,重点研究天然气水合物分解引发的地质灾害和环境影响以及检测与评价技术^[25]。

挪威也很重视天然气水合物的环境影响,已在海底灾害预防和深海二氧化碳封存方面取得了重要研究进展^[36]。2006—2011年,挪威在巴伦支海—斯瓦尔特群岛开展了天然气水合物在海底稳定性评价以及气候和生态的相关研究。另外,挪威在深海二氧化碳封存技术以及海底滑坡检测等相关研究中都有显著进展,值得各国借鉴学习。

刚果、新西兰、巴基斯坦等国家都对天然气水合物的研究非常感兴趣,开展了不同程度的调查和研究^[37-39]。

2 国内天然气水合物研究进展

中国的天然气水合物调查研究已取得重大进展与突破,总体上可分为3个阶段^[40]。

第一阶段:研究预查阶段(1985—2001年)。1985年,中国开始关注并获取天然气水合物的相关信息。1995年、1997年、1998年中国大洋矿产资源研究开发协会、原地质矿产部、国家“863”计划分别设立了海域天然气水合物研究调研的专项课题,大力促进了我国的水合物资源调查工作。1999年,国土资源部首次证实在南海北部存在似海底反射层(BSR)。2001年,在青岛建成中国第一个拥有自主知识产权的“天然气水合物模拟实验室”,并成功合

成样品。

第二阶段:调查突破阶段(2002—2010年)。2002—2004年,国家在南海开展地球物理、地球化学、地质、生物等调查研究,初步圈定天然气水合物找矿重点目标区。2006年,中国地质调查局与国际科学家讨论南海天然气水合物钻井方案。2007年,在神狐海域获取中国第一件水合物实物样品。海域水合物调查的同时,中国地质调查局开展了东北、青藏高原等永久冻土区的天然气水合物调查,并发现水合物存在标志。2010年,国家开发银行与中国地质调查局共同完成《我国天然气水合物中长期规划(2010—2030)》,促成了国家新一轮天然气水合物专项的确立并实施。

第三阶段:勘查试开采阶段(2011—2020年)。2011年,中国地质调查局首次在祁连山运用降压法和加热法成功从地下天然气水合物中分解出天然气。2013年中国地质调查局广州海洋地质调查局在珠江口东部钻获高纯度天然气水合物样品,并推测调查区水合物资源量巨大,相当于一特大型常规天然气田^[41]。2015年,在神狐海域再次钻探证实超千亿方级天然气水合物矿藏^[42]。2016年,确定了神狐海域的水合物钻采目标。2017年,广州海洋地质调查局在神狐海域首次进行天然气水合物试采,成功从水深1266m海底以下203~277m的天然气水合物矿藏开采出天然气,试采产气持续60天,累计产气量超过30万 m^3 ,平均日产气5000 m^3 以上,最高产气量达3.5万 m^3/d 。此次试采取得了持续产气时间长、气流稳定、环境安全等多项重大突破性成果,开启了海域天然气水合物试采的新篇章。

2018年10月18日,在天津举行的2018(第二十届)中国国际矿业大会上,《中国矿产资源报告2018》正式发布。据报告显示,初步预测,中国海域天然气水合物资源量约 $8 \times 10^{10} \text{ t}$ 油当量^[43]。通过多年的勘探研究及关键技术攻关,我国已形成了一套包括地形地貌、地层剖面、样品、海水等资料获取的针对海域天然气水合物调查的技术方法体系。目前,广州海洋地质调查局正计划在南海海域进行第二轮天然气水合物试采。

3 我国天然气水合物研究开发展望

天然气水合物以其分布广、规模大、埋藏浅、能

效高、污染低等特点,势必成为未来的主流能源,所以对天然气水合物的研究、开发、利用是未来的发展趋势。目前已有 30 余个国家和地区开展了天然气水合物的相关工作,研究重点已从资源勘查转向开发利用,且开采工作进展可观。试采领域从陆地转向海洋,试采规模逐渐扩大,试采方法也不断更新,先后实施了加热法、降压法、注入化学试剂法、驱替法等。纵观天然气水合物的发展史,可以预测实现其商业性开发指日可待。我国能源短缺且需求量大,而我国天然气水合物资源潜力巨大,如果能实现商业性开发将会大大解决我国的能源问题。

在短短 30 余年里,我国在天然气水合物的研究方面已实现了海域水合物的成功试采,发展迅速,但天然气水合物的开采还面临很多问题与挑战,仍需要科研工作者的不懈努力,在此对我国未来天然气水合物的研究提出以下几点建议。①对重点目标区加大研究力度,以实现试采成果最大化。②加大海域和陆域天然气水合物的资源调查力度,寻找更多可供试采的水合物矿区。③与国际接轨,加强国际合作,及时了解国际水合物调查、试采、政策的最新动向,吸取前人失败与成功的经验,寻找适合我国的水合物开发道路。④考虑经济问题,以期实现低成本、高效率的开发模式。⑤把环境安全放在突出位置,尽可能避免水合物开采带来的环境及地质灾害问题。

4 结论

(1)美国、日本、印度、韩国、加拿大和俄罗斯等国家都对天然气水合物开展了不同程度的调查与试采工作,取得了突破性进展,但也存在一些问题与挑战。

(2)我国的海域天然气水合物试采工作取得了成功,建议继续加大调查力度、加强国际合作,同时考虑经济问题和环境安全,谋求更好的发展。

参考文献

- [1] KVENVOLDEN K A. A primer on the geological occurrence of gas hydrate[C]//HENRIET J P, MIENERT J. Gas hydrates; relevance to world margin stability and climate change. London: Geological Society, Special Publication; 1998, 9—30.
- [2] 王淑玲, 孙张涛. 全球天然气水合物勘查试采研究现状及发展趋势[J]. 海洋地质前沿, 2018, 34(7): 24—32.
- [3] 沙志斌, 许振强, 王平康, 等. 世界天然气水合物研究发展对我国加快推进其产业化的启示[J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(8): 1—10.
- [4] U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy. A strategy for Methane Hydrates Research & Development[R]. U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy, 1998, 34.
- [5] ALEXEI V. MILKOV, ROGER SASSEN. Estimate of gas hydrate resource, northwestern Gulf of Mexico continental slope[J]. Marine Geology, 2001, 179, 71—83.
- [6] DAI J, BANIK N, GILLESPIE D, et al. Exploration for gas hydrates in the deepwater, northern Gulf of Mexico: Part II. Model validation by drilling [J]. Marine and Petroleum Geology, 2008, 25(9): 845—859.
- [7] 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: 31—40.
- [8] BOSWELL R, COLLETT T S, FRYE M, et al. Subsurface gas hydrates in the northern Gulf of Mexico[J]. Marine and Petroleum Geology, 2012, 34(1): 33—38.
- [9] LU S M. A global survey of gas hydrate development and reserves; Specifically in the marine field[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 41: 884—900.
- [10] OKUDA Y. Natural gas hydrate as future resources[J]. J Jpn Inst Eng, 1993, 6: 425—435.
- [11] SATOH M, MAEKAWA T, OKUDA Y. Estimation of amount of methane and resources of natural gas hydrates in the world and around Japan[J]. J Geol Soc Jpn, 1996, 102(11): 959—971.
- [12] METI. Japanese methane hydrate development plan [R]. METI, 2001, 8.
- [13] SATOH M. 南海海槽等海域天然气水合物资源评价[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(6): 512—513.
- [14] COLWELL F, MATSUMOTO R, REED D. A review of the gas hydrates, geology, and biology of the Nankai Trough[J]. Chemical Geology, 2004, 205(3—4): 391—404.
- [15] KRASON J. Study of 21 marine basins indicates wide prevalence of hydrates[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1994, 54(8): 34—35.
- [16] USGS. International Gas Hydrate Research[R]. USGS, 2014.
- [17] TAKAHASHI H, TSUJI Y. Multi-well exploration program in 2004 for natural hydrate in the Nankai-Trough offshore Japan[C]//Offshore Technology Conference, Houston, Texas, U.S.A., 2005, 10.
- [18] FUJII T, SUZUKI K, TAKAYAMA T, et al. Geological

- setting and characterization of a methane hydrate reservoir distributed at the first offshore production test site on the Daini-Atsumi Knoll in the eastern Nankai Trough, Japan[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2015, 66: 310—322.
- [19] YAMAMOTO K, RUPPEL C. Preface to the special issue on gas hydrate drilling in the Eastern Nankai Trough[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2015, 66: 295.
- [20] CHEN L, FENG Y, OKAJIMA J, et al. Production behavior and numerical analysis for 2017 methane hydrate extraction test of Shenhu, South China Sea[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, 53: 55—56.
- [21] 石慧. 日本第二次天然气水合物试采结束[N]. *中国石化报*, 2017—07—25(3).
- [22] SAARC Energy Centre. Gas Hydrates Resource Potential of South Asia[R]. Published by SAARC Energy Centre, Islamabad, Pakistan, 2010. (SAARC = South Asian Association for Regional Cooperation).
- [23] SAIN K, GUPTA H. Gas hydrate in India: Potential and development[J]. *Gondwana Research*, 2012, 22: 645—657.
- [24] 陈建东, 孟浩. 主要国家海洋天然气水合物研究现状及我国对策[J]. *世界科技研究与发展*, 2013, 35(4): 560—564.
- [25] 王力峰, 付少英, 梁金强, 等. 全球主要国家水合物探采计划与研究进展[J]. *中国地质*, 2017, 44(3): 439—448.
- [26] HOROZAL S, BAHK J J, URGELES R, et al. Mapping gas hydrate and fluid flow indicators and modeling gas hydrate stability zone(GHSZ) in the Ulleung Basin, East(Japan) Sea: Potential linkage between the occurrence of mass failures and gas hydrate dissociation[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 80: 171—191.
- [27] 樊栓狮, 陈玉娟, 郎雪梅, 等. 韩国天然气水合物研究开发思路及对我国的启示[J]. *中国能源*, 2009, 14(10): 20—25.
- [28] YOO D G, KANG N K, YI B Y, et al. Occurrence and seismic characteristics of gas hydrate in the Ulleung Basin, East Sea [J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2013, 47: 236—247.
- [29] LIU L P, RYU B J, SUN Z L, et al. Monitoring and research on environmental impacts related to marine natural gas hydrates: Review and future perspective[J]. *Journal of Natural Gas Sciences and Engineering*, 2019, 65: 82—107.
- [30] 杨明清, 赵佳伊, 王倩. 俄罗斯可燃冰开发现状及未来发展[J]. *石油钻采工艺*, 2018, 40(2): 198—204.
- [31] ШАГАПОВ В Ш, УРАЗОВ Р П. Характеристики газопровода при наличии гидратоотложений [J]. *Теплофизика Высоких Температур*, 2004, 42(3): 461—468.
- [32] MAKOGON Y F, HOLDITCH S A, MAKOGON T Y. Russian field illustrates gas-hydrate production[J]. *Oil and Gas Journal*, 2005, 103(5): 43—50.
- [33] MAJOROWICZ J A, OSADETZ K G, RUPPEL C D, et al. Gas hydrate distribution & volume in Canada[J]. *AAPG Bulletin*, 2001, 85(7): 1211—1230.
- [34] DALLIMORE S R, COLLETT T S. Summary and implication of the Mallik 2002 gas hydrate production research well program[J]. *Geological Survey of Canada, Bulletin*, 2005, 585: 1—36.
- [35] LI X S, XU C G, ZHANG Y, et al. Investigation into gas production from natural gas hydrate: a review [J]. *Applied Energy*, 2016, 172: 286—322.
- [36] BIASTOCH A, TREUDE T, RUPKE L H. Rising Arctic Ocean temperatures cause gas hydrate destabilization and ocean acidification[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38: 25—36.
- [37] KASTEN S, NOTHEN K, HENSEN C, et al. Gas hydrate decomposition recorded by authigenic barite at pockmark sites of the northern Congo Fan[J]. *Geo-Marine Letters*, 2012, 32: 515—524.
- [38] CRUTCHLEY G J, MOUNTJOY J J, PECHER I A, et al. Submarine slope instabilities coincident with shallow gas hydrate systems: Insights from New Zealand examples [C]// Lamarche G, et al. (eds.) *Submarine mass movements and their consequences*, *Advances in Natural and Technological Hazards Research* 41, 2016, 401—409.
- [39] EHSAN M I, AHMED N, KHALID P, et al. An application of rock physics modeling to quantify the seismic response of gas hydrate-bearing sediments in Makran accretionary prism, offshore, Pakistan [J]. *Geosciences Journal*, 2016, 20(3): 321—330.
- [40] 张洪涛, 张海敏, 许振强. 中国天然气水合物[J]. *中国地质调查*, 2014, 1(3): 1—6.
- [41] ZHANG G X, YANG S X, ZHANG M, et al. GMGS2 expedition investigations rich and complex gas hydrate environment in the South China Sea[J]. *NETL, Fire in the Ice (Methane Hydrate Newsletter)*, 2014, 14(1): 1—5.
- [42] 中国地质调查局. 科技创新, “首次”背后的实力支撑: 我国海域天然气水合物成功试采的前因后果深度透视之三 [EB/OL]. 2017—06—05 [2017—06—03]. http://www.cgs.gov.cn/ddzt/jqthd/trqshw/zxbdshw/201706/t20170605_431529.html.
- [43] 中华人民共和国中央人民政府. 我国海域天然气水合物资源量约 800 亿吨油当量 [EB/OL]. (2018—10—18) [2018—10—18]. http://www.gov.cn/xinwen/2018-10/18/content_5332157.htm.