

文章编号: 1001-909X(2008)02-0067-08

南海北部天然气水合物研究进展

邓希光, 吴庐山, 付少英, 吴能友

(广州海洋地质调查局, 广东 广州 510760)

摘 要: 天然气水合物是一种新型的储量巨大的绿色能源, 是目前世界各国研究界的研究热点之一。我国以及美国、日本、印度、韩国等国家都采集到了天然气水合物的实物样品。虽然我国对天然气水合物的研究起步较晚, 但近年来的研究已经取得了飞速的进步, 而且也于 2007 年 5 月在南海北部陆坡的神狐海域成功采集到天然气水合物的实物样品, 这是在南海海域首次获取天然气水合物实物样品, 证实了南海北部蕴藏着丰富的天然气水合物资源, 标志着我国天然气水合物调查研究水平又上了一个新的台阶。目前, 南海北部陆坡已经作为我国天然气水合物未来开发的战略选区之一。在总结我国天然气水合物以往十几年研究工作的基础上, 综述了我国天然气水合物近年来在南海北部的地质、地球物理、地球化学 3 个方面的研究进展, 提出了未来天然气水合物勘探和研究的方向和建议。

关键词: 研究进展; 天然气水合物; 南海北部

中图分类号: P744.4

文献标识码: A

0 引言

天然气水合物是一种新型的绿色能源, 它是由气体分子 (主要是甲烷) 与水组成的固体物质, 当它完全燃烧时只生成几乎无任何污染的二氧化碳和水。全球的天然气水合物中所含的有机碳总量相当于全球已知煤、石油和天然气有机碳储量的两倍, 在标准大气压下, 每立方米饱和天然气水合物可释放出约 164 m³ 的甲烷气体, 其能量密度约是煤、黑色页岩的 10 倍, 是常规天然气的 2~5 倍。世界各国对天然气水合物潜在的能源优势给予了极大的关注, 美国、加拿大、日本等国家已经采集到了实物样品, 并且与印度、德国等国家在加拿大马更些三角洲 (Mackenzie delta) 进行的试开采实验中取得成功, 这有力地促进了天然气水合物的研究和开发利用^[1]。天然气水合物是一个不稳定的碳库, 它不仅影响着全球的气候, 同时也是海底潜在的地质灾害因素之一。目前, 全球有

30 多个国家和地区开展了天然气水合物的调查研究工作, 已在 116 个地区发现了天然气水合物存在的标志或实物样品, 其中在陆地地上有 38 处 (永久冻土带), 在海洋中有 78 处^[2]。

我国对天然气水合物的研究开展得比较晚, 20 世纪 80 年代中期才陆续有翻译和报道国外天然气水合物的调查和研究成果^[3-4]。1995 年起, 在中国大洋协会和原地质矿产部的支持下, 我国先后实施了“西太平洋天然气水合物找矿前景与方法的调研”和“中国海域天然气水合物勘测研究调研”2 项研究课题。1998 年, 国家高技术研究发展计划 (“863”计划) 海洋领域 “820” 主题还启动了 “海底天然气水合物资源探查的关键技术” 课题, 并经过南海北部示范区的试验, 初步探索了 BSR 处理技术和在我国当前技术条件下的地球化学、地热学研究方法。1999 年 10 月起, 广州海洋地质调查局率先在南海北部陆坡区开展了天然气水合物的实际调查, 由此我国天然

收稿日期: 2006-12-30

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目 (04006103); 中国地质调查局天然气水合物评价及勘探开发战略研究资助项目; 中国科学院广州地球化学研究所、南海海洋研究所边缘海地质重点实验室研究基金课题联合资助项目 (MSGLO4-7)

作者简介: 邓希光 (1969—), 男, 湖南双峰县人, 高级工程师, 博士, 主要从事海洋地质和地球化学研究。

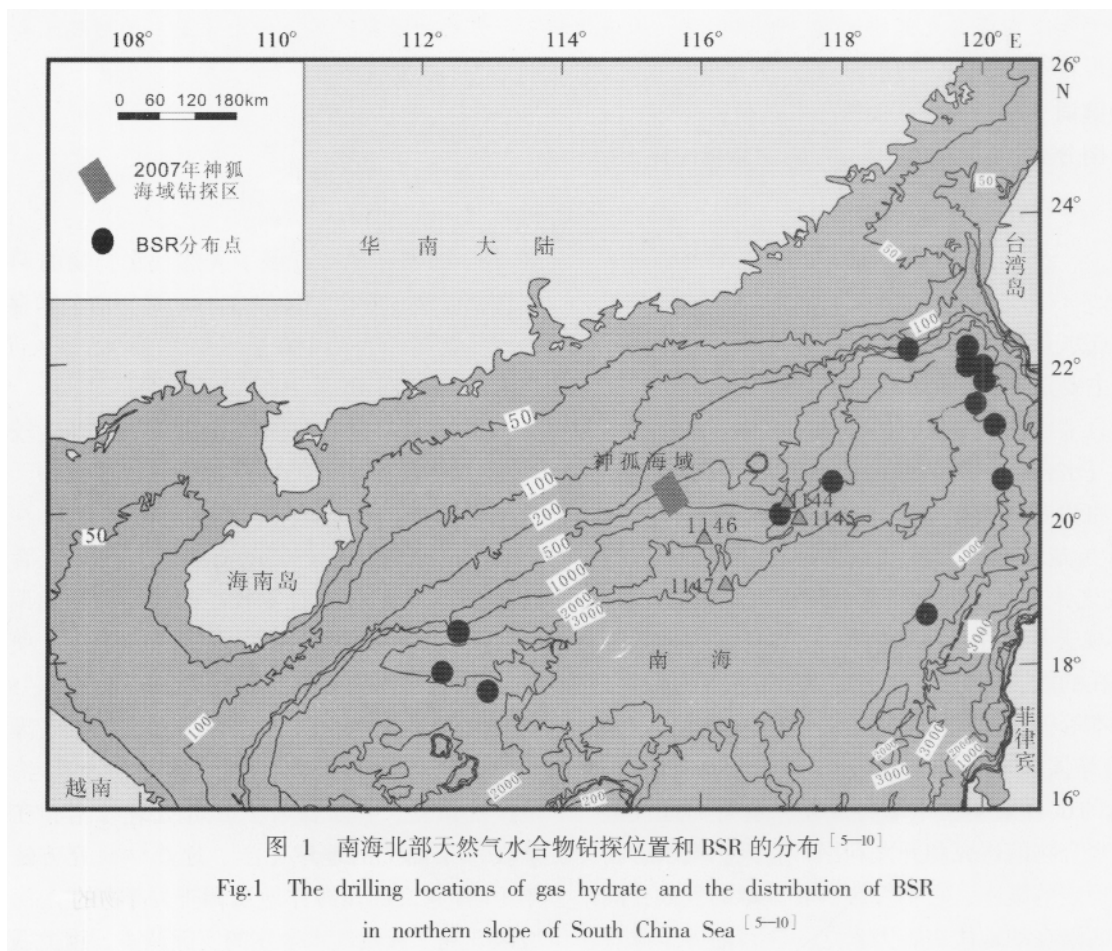
KVENVOLDEN K A. Gas hydrate as a potential energy source—a review of their methane content. In: HOWELL D G (Ed.), USGS professional paper, 1993, 1570: 555—561.

气水合物的研究进入了快速发展时期。目前我国已在天然气水合物的实验室模拟、物化性质、资源评价等方面开展了多项研究,并对我国南海海域天然气水合物资源前景进行了调查。

我国天然气水合物的调查和研究区域主要集中在南海北部,并兼顾了东海海域以及南海的其它海域,调查的同时也开展了一些基础性的研究工作,并取得了大量的研究资料。中国地质调查局在数年综合调查的基础上,于 2007 年 5 月在南海北部的神狐海域正式采集到了天然气水合物的实物样品,成为继美国、日本、印度之后第 4 个通过国家级研发计划采集到天然气水合物实物样品的国家(图 1)。在南海发现天然气水合物的神狐海域成为世界上第 24 个采集到天然气水合物实物样品的地区,也是第 22 个在海底采集

到天然气水合物实物样品的地区和第 12 个通过钻探工程采集到天然气水合物实物样品的地区。在这次天然气水合物的钻探航次中,在神狐海域约 1 200 m 的水深中的 3 个站位采集到了天然气水合物的实物样品,这些天然气水合物在泥质沉积层中呈浸染状产出。此次成功获取了天然气水合物实物样品,展示了我国南海北部海域巨大的天然气水合物资源远景,证实了我国有关基础性地质工作的可靠性,也标志着我国天然气水合物调查研究水平跨入了世界领先的行列。

本文在对南海北部以往几年里进行的天然气水合物调查研究的基础上,对研究所取得的进展从地球物理、地质和地球化学 3 个方面进行了归纳和总结,并提出了今后研究的方向和重点,为未来了解、认识和研究天然气水合物提供科学参考。



1 地球物理研究进展

众所周知,海洋天然气水合物的研究是从地球物理研究开始的,当 MARKL *et al* [11] 在地震剖面上识别出似海底反射层 (bottom simulating reflectors, BSR) 时,就推测其与海洋天然气水合物的存在有

关。之后的深海钻探和大洋钻探以及现在的综合大洋钻探均证实了 BSR 与天然气水合物的存在密切相关,并认为海底反射层是天然气水合物稳定带底界的地球物理识别标志。尽管目前已在现场无 BSR 的地区采集到了天然气水合物,而在有 BSR 的地区也不一定采集到天然气水合物,但 BSR 的识别仍然是天然

气水合物勘探的首选标志。

南海北部的天然气水合物的研究也是从 BSR 的研究开始的。REED *et al* [5] 最早报道了在南海存在 BSR，并在台湾南部海域鉴别出 BSR。1998 年，我国学者姚伯初在研究了 10 万余公里的多道地震后发现，在东沙群岛和西沙海槽有 BSR，并推测这些地区存在天然气水合物 [6]。同时，台湾学者 CHI *et al* [7] 在处理 1990 年台湾近海的地震资料时也发现了面积达 2 万 km² 的 BSR，并推测该区域存在天然气水合物。在完成大洋钻探 184 航次后，宋海斌 等 [8]、吴时国 等 [9]、WU *et al* [10] 收集了德国“太阳号”用于确定站位的地震剖面，识别出 BSR 和其它地球物理标志。广州海洋地质调查局经过数年的调查后，在南海北部陆坡的东沙群岛南部、西沙海槽的南北斜坡、笔架南盆地东缘等地发现了多处 BSR [4, 12]，在完成“973”项目过程中，该项目组还在台湾西南海域识别出 BSR、振幅空白和极性反转等地震标志，结合区域地质资料，认为该地区有良好的天然气水合物成矿前景 [13-14]。

在天然气水合物的调查中，BSR 是第一也是最重要的地球物理指标，但空白带、速度振幅异常和波形反转等其它地球物理指标也是调查中不可忽略的指标。在南海北部天然气水合物的地球物理调查中也进行了空白带、速度振幅异常和波形反转等指标的调查 [3, 7, 14-18]，这些地球物理标志与 BSR 相伴随，说明了南海北部具有良好的天然气水合物成矿前景。此外，梁劲 等 [19] 对南海北部陆坡可能存在天然气水合物的地区进行了速度特征的综合研究，认为高精度速度分析有利于确定天然气水合物的富集层位；文鹏飞 等 [20] 从天然气水合物或游离气的地震特性出发，从反演的角度取得了天然气水合物的物性参数，证明了剖面上 BSR 的强弱与天然气水合物含量之间的关系。刘学伟 等 [21] 以南海北部 HD152 测线为例，就如何提高当 BSR 和空白带特征不明显时天然气水合物识别的可信度进行了讨论，认为利用剖面中纵波和横波的速度、泊松比以及部分 AVO 属性可识别天然气水合物和游离气。

总之，南海北部的地球物理研究进展表明，南海北部陆坡是存在天然气水合物的。2007 年 5 月在南海北部神狐海域 BSR 区域采集到天然气水合物的实物样品，证实了以往地球物理研究成果的可靠性。

2 地质研究进展

在进行地球物理调查和研究的同时，许多研究者对南海北部天然气水合物还进行了地质方面的调查和研究，对天然气水合物在南海北部存在的可能性进行了有益的探讨 [4, 12, 22-28]，本文就近年来在南海北部发现的天然气水合物存在的一些证据进行了讨论。

作为我国勘探和开发的首选地区，南海北部的天然气水合物地质方面调查和研究已经取得了巨大的进展。在当前能源短缺的形势下，祝有海 等 [22-23]、卢振权 等 [29]、赵生才 [30-31]、张光学 等 [4, 12]、何家雄 [32] 和姚伯初 等 [28] 建议尽快实施我国南海北部天然气水合物的钻探和研究工作。广州海洋地质调查局早在 2002 年就在南海北部东沙群岛取得了冷泉碳酸盐岩 [33-35]，2004 年中国地质调查局和德国基尔大学海洋科学研究所合作开展的科学考察也进一步证实了其存在，并认为其面积可达 430 km²，这是在南海北部发现天然气水合物存在的 BSR 证据以来的又一重要证据。在 2005 年的南海北部科学考察中，中国科学院南海海洋研究所又在南海北部发现了两个冷泉碳酸盐岩站位 [36]，陆红锋 等 [37] 也报道了 2004 年广州海洋地质调查局在南海北部神狐海区获得了大量的碳酸盐岩烟囱的调查结果。对这些碳酸盐岩，我国研究者进行了岩石学、矿物学、地球化学以及生物学等方面的研究 [33-34, 36-38]，结果表明：这些碳酸盐岩主要是由碳酸盐矿物、陆源碎屑和粘土矿物组成，含有少量的黄铁矿和针铁矿，将其与世界上获得天然气水合物地区的碳酸盐岩进行对比表明，南海北部存在天然气水合物的可能性很大。

除了发现碳酸盐岩烟囱外，在南海北部还发现了与天然气水合物有关的地貌特征。SHYU *et al* [39] 报道了在台湾西南部地区发现了泥底辟，并估算了其热流；CHOW *et al* [40] 也认为台湾西南部地区不仅存在泥底辟，还存在麻坑；陈多福 等 [26] 报道了琼东南盆地存在泥底辟的研究结果；王宏斌 等 [26]、沙志彬 等 [41] 在讨论底辟构造与天然气水合物的关系时发现，南海北部陆坡发育有大量的泥底辟。研究中发现，大部分的泥底辟与 BSR 伴生，且从具有天然气水合物的地区来看，泥底辟有利于天然气水合物的运移和保存；同时，由于南海北部陆缘属于被动大陆边缘，受

黄永样，ERWIN S，吴能友. 东沙海域东北天然气水合物存在的地质背景与证据. 海峡两岸天然气水合物学术研讨会论文集，2005 3—4.

新生代的构造影响较大,海槽、海谷、海山、海丘、陡坡、陡坎、海底高原、陆坡台地、海底滑塌及海底扇等各种构造地貌发育^[12],这些构造地貌为天然气水合物的形成提供了有利条件。

一些研究者也讨论了南海北部的沉积条件与天然气水合物形成的关系^[11,42-45]。吴时国等^[9]在讨论东沙海区的天然气水合物形成及分布的地质因素时认为,在东沙群岛地区存在与天然气水合物有关的3种沉积类型;张志杰等^[43]讨论了南海北部的台湾西南部地区附近的构造沉降与沉积作用对天然气水合物的控制;于兴河等^[42]根据整个南海的沉积条件并结合其它地质条件,探讨了南海存在天然气水合物的有利区块;苏新等^[44]根据南海北部陆坡中新世以来的沉积物特性,讨论了南海北部的天然气水合物形成的有利分布区域;MCDONNELL et al^[45]从台湾西南部构造和沉积方面讨论了台湾西南部天然气水合物可能存在的区域。

对于南海北部天然气水合物存在的地热条件,金春爽等^[46]、JIN et al^[47-48]讨论了地热场特征以及有利于天然气水合物分布的地热场,同时讨论了地热对天然气水合物的影响。陈多福等^[33]、陈忠等^[36]和CHEN et al^[34]还发现了在冷泉碳酸盐岩中存在石化的微生物细菌。卢振权等^[29]利用卫星热红外遥感探测了南海的天然气水合物,并预测了其分布区域,在这种条件下,也有研究者估算了南海天然气水合物的资源量^[49-50]。

总之,南海北部的地质条件使其拥有了存在天然气水合物的可能性,而其所起的作用在2007年5~6月的天然气水合物钻探航次中得到了证实。

3 地球化学研究进展

在寻找天然气水合物时,除了寻找地质和地球物理方面的标志外,地球化学标志也是天然气水合物存在的有利证据。

我国的研究者首先是从对顶空气的甲烷含量以及碳同位素的研究开始进行天然气水合物地球化学标志研究的。从全球天然气水合物的产地来看,甲烷来源大部分是生物成因的,仅有2个典型的地区发现有热解成因的甲烷存在,即墨西哥湾和挪威-格陵兰海(Norwegian-Greenland Sea)^[51],但是热解气也可能破坏深部烃类气体源^[52]。从已有的研究成果看,南海北部区具有甲烷气体的异常分布区,但它的烃类气体主要来源于深部热解成因的气体,可能也混合有浅部

生物成因的气体^[22,53-55]。祝有海等^[23]在绘制和分类酸解气分布图时发现,在西沙海槽西缘、台西南盆地与笔架南盆地等区域存在明显的高甲烷含量异常,尤其是台西南盆地和笔架南盆地,甲烷含量较高,常常大于200 L/kg,且这类高甲烷含量异常区往往与BSR分布区一致。吴必豪等^[53]、孙春岩等^[54]测得西沙海槽区域的甲烷碳同位素值($^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$)分别为 -38×10^{-3} ~ -22×10^{-3} 和 -51×10^{-3} ~ -34.18×10^{-3} ,他们利用甲烷碳同位素值和烃类气体组成判别图分析了西沙海槽气体的成因,认为该区域气体以热解成因为主,生物成因的气体仅为少量。王宏语等^[56-57]测定了西沙海槽的烃类气和碳同位素值,认为该地区的气体主要是海底表层沉积物所含的甲烷气,是以热解成因为主的,少量为生物成因的。

对碳酸盐岩进行的碳、氧同位素分析得到了两种不同的结论。陈多福等^[33]和CHEN et al^[34]利用广州海洋地质调查局采集的3个样品,分析了碳、氧同位素,得到该区碳同位素和氧同位素($^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$)值分别为 -51.76×10^{-3} ~ -51.25×10^{-3} 和 4.76×10^{-3} ~ 5.11×10^{-3} 。陆红锋等^[38]分析测得台西南21个碳酸盐岩样品的 $^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为 -56.88×10^{-3} ~ -36.83×10^{-3} ,其中大部分 $^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值小于 -40.0×10^{-3} ; $^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值为 2.19×10^{-3} ~ 5.04×10^{-3} ,其中大部分 $^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值大于 4.0×10^{-3} 。陆红锋等^[37]分析了3个神狐海区的碳酸盐岩的碳、氧同位素,得到 $^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为 -40.18×10^{-3} ~ -38.69×10^{-3} , $^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 为 3.75×10^{-3} ~ 4.31×10^{-3} ,认为碳主要来自于生物成因的甲烷,是由甲烷厌氧氧化作用生成的。陈忠等^[36]对所取得的碳酸盐岩样品进行的碳、氧同位素分析,得到 $^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值为 -36.07×10^{-3} ~ -18.24×10^{-3} , $^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值为 0.42×10^{-3} ~ 2.76×10^{-3} ,认为碳来源于热解成因气或混合气。上述研究表明,对于天然气水合物区气体的成因有两种结论,一个与全球大部分天然气水合物的碳酸盐岩同位素的结果相似,另一个则与甲烷同位素的结论一致。由于上述两种结论所采集样品的位置不同,因此产生两种不同结论的具体原因还有待于今后的进一步研究。

Cl^- 浓度异常和 SO_4^{2-} 浓度梯度已经成为目前天然气水合物最为重要的地球化学指标,这是在总结了DSDP和ODP的钻孔资料后得来的。但是由于钻孔的取样深度一般是在百米以上,而南海北部沉积物的最大取样深度只有8~9 m,所以很难通过 Cl^- 浓度异常和 SO_4^{2-} 浓度梯度两项地球化学指标对南海北部地区是否存在天然气水合物进行判断,不过若南海北部

区与存在天然气水合物地区在上述两项地球化学指标上相类似,那么天然气水合物存在的可能性是很大的。蒋少涌等^[58]从南海北部海底沉积物孔隙水中的 Cl^- 和 SO_4^{2-} 离子浓度特征发现,有些站位沉积物的地球化学指标与含天然气水合物沉积物的典型地区的地球化学指标相类似,同时,在讨论SMI界面时还发现,南海北部的SMI界面深度为20 m以内,与ODP204和ODP164钻孔得到的SMI界面的深度相一致,这些站位都正好位于BSR的分布区内,可见在这些站位下面存在天然气水合物的可能性很大。杨涛等^[59]从南海北部海底沉积物孔隙水中的氢、氧同位素特征的角度讨论了其对天然气水合物的指示意义,发现A14站位的8个样品中与天然气水合物有关的重同位素值(D 和 ^{18}O)随深度呈增大的趋势,指示出该区存在天然气水合物的可能性极大。

研究者还根据单一站位地球化学的异常特征讨论了其存在天然气水合物的可能性。ZHU et al 和王建桥等^[60]根据大洋钻探184航次1146站位的孔隙水和顶空气的地球化学和同位素特征讨论了天然气水合物存在的可能性;祝有海等^[61]研究了S14站位的地球化学异常,认为在该站位之下可能存在天然气水合物;邓希光等^[62]研究了HD196站位的地球化学特征,并结合其它的资料认为,该站位之下可能存在天然气水合物;杨涛等^[63]分析了南海北部陆坡西沙海槽XS-01站位沉积物孔隙水的地球化学特征,认为该站位是西沙海槽区最有利的天然气水合物赋存区,值得做进一步的勘查工作。此外,刘坚等^[64]根据东沙群岛浅层沉积物硫化物分布特征讨论了该地区存在天然气水合物的可能性,认为沉积物中高含量的硫化物与天然气水合物分解形成的甲烷流有直接的关系。

总之,南海北部的地球化学证据表明,在南海北部陆坡存在天然气水合物的可能性是很大的,该区的地质和地球物理条件以及在2007年的钻探调查都证实了其存在的可能性。

4 结论与建议

从地球物理、地质和地球化学3方面的研究成果中可知,南海北部陆坡存在着天然气水合物,东沙群岛附近的台西南盆地是天然气水合物重点的赋存地

区。考虑了多种复杂的原因后,神狐海域被选定为本文航次的钻探地区。在钻探开始前,经过对该海域地球物理资料的精细处理和反复研究,圈定出了2个重要目标区,确定了8个钻探井位,2007年5月1日终于采集到了天然气水合物的实物样品。这次天然气水合物实物样品的采集,证实了以往基础性研究成果的可靠性,是我国天然气水合物研究和开发的一个划时代里程碑。为进一步开展天然气水合物的研究工作,本文认为主要应对以下内容进行进一步研究:(1)利用已采集到的实物样品进行多学科的研究;(2)充分吸收国外钻探的成果,继续扩大寻找天然气水合物的范围;(3)研究工作重心可由以往的综述性、总结性研究转入到以勘探开发和利用为主的实际应用研究中;(4)注意天然气水合物对环境的影响;(5)汲取以往钻探和取样的成功经验,为未来在南海北部进一步开展天然气水合物的钻探和研究工作做准备。

参考文献:

- [1] 祝有海. 加拿大马更些冻土区天然气水合物试生产进展与展望[J]. 地球科学进展, 2006, 21 (5): 513—520.
- [2] 许红, 黄君权, 夏斌, 等. 最新国际天然气水合物研究现状与资源潜力评估(上)[J]. 天然气工业, 2005, 25 (5): 21—25.
- [3] 史斗, 孙成权, 朱岳年. 国外天然气水合物研究进展[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1992.
- [4] 张光学, 黄永祥, 陈邦彦. 海域天然气水合物地震学[M]. 北京: 海洋出版社, 2003.
- [5] REED D L, LUNDBERG N, LIU C S, et al. Structural relations along the margin of the offshore Taiwan accretionary: implications for accretion and crustal kinematics [J]. Acta Geologica Taiwanica, 1992, 30: 105—122.
- [6] 姚伯初. 南海北部陆缘天然气水合物初探[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1998, 18 (4): 11—18.
- [7] CHI Wu-Cheng, REED D L, LIU Char-Shine, et al. Distribution of the bottom-simulation reflector in the offshore Taiwan collision Zone [J]. TAO, 1998, 9 (4): 779—794.
- [8] 宋海斌, 耿建华, WANG How-king, 等. 南海北部东沙海域天然气水合物的初步研究[J]. 地球物理学报, 2001, 44 (5): 687—695.
- [9] 吴时国, 张光学, 郭常升, 等. 东沙海区天然气水合物形成及分布的地质因素[J]. 石油学报, 2004, 25 (4): 7—12.
- [10] WU S, ZHANG G, HUANG Y, et al. Gas hydrate occurrence on the continental slope of the northern South China Sea [J]. Ma-

ZHU Y H, HUANG Y Y, MATSUMOTO R, et al. Geochemical and stable isotopic compositions of pore fluids and authigenic siderite concretions from site 1146, ODP Leg 184: implication for gas hydrate. In: PREL W L, WANG P, REA D K, CLEMENS S C, eds. Proceedings of the ODP, Scientific Results, 2002, 184: 1—15.

- rine and Petroleum Geology, 2005, 22: 403—412.
- [11] MARKI R G, BRYAN G M, EWING J I. Structure of the Blake-Bahama outer ridge [J]. Journal of Geophysical Research, 1970, 75: 4 539—4 555.
- [12] 张光学, 黄永样, 祝有海, 等. 南海天然气水合物的成矿远景 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22 (1): 75—81.
- [13] 邓辉, 阎贫, 刘海岭. 台湾西南海域似海底反射分析 [J]. 热带海洋学报, 2005, 24 (2): 79—85.
- [14] 丁巍伟, 陈汉林, 王渝民, 等. 台湾增生楔天然气水合物的地震特征 [J]. 海洋与湖沼, 2006, 37 (1): 90—96.
- [15] 符溪, 杨木壮, 文鹏飞, 等. 南海天然气水合物地震资料处理及其特征 [J]. 地质科技情报, 2001, 20 (4): 33—40.
- [16] 黄永样, 张光学, 金庆焕, 等. 南海北部陆坡天然气水合物地质地球物理特征及其前景初探 [C] // 中国地质学会 80 周年论文集. 北京: 地质出版社, 2002: 421—431.
- [17] 徐华宁, 郑晓东, 张光学. 南中国海存在天然气水合物的地球物理证据 [J]. 地质科技情报, 2006, 25 (2): 60—63.
- [18] XU Hua-ning, LI Li-qing, SHU Hu, et al. The seismic reflecting characteristics of gas hydrate bearing strata and its possible distribution in the South China Sea [J]. Applied Geophysics, 2006, 3 (1): 42—47.
- [19] 梁劲, 王宏斌, 郭依群. 南海北部陆坡天然气水合物的地震速度研究 [J]. 现代地质, 2006, 20 (1): 123—129.
- [20] 文鹏飞, 张宝金. 利用 AVO 研究西沙海槽水合物与 BSR 的对应关系 [J]. 地学前缘, 2005, 12 (3): 277—281.
- [21] 刘学伟, 李敏锋, 张聿文, 等. 天然气水合物地震响应研究——中国南海 HD152 测线应用实例 [J]. 现代地质, 2005, 19 (1): 33—38.
- [22] 祝有海, 吴必豪, 卢振权. 中国近海天然气水合物找矿前景 [J]. 矿床地质, 2001a, 20 (2): 174—180.
- [23] 祝有海, 张光学, 卢振权, 等. 南海天然气水合物成矿条件与找矿前景 [J]. 石油学报, 2001b, 22 (5): 6—12.
- [24] 陈多福, 姚伯初, 赵振华, 等. 珠江口和琼东南盆地天然气水合物形成和稳定分布的地球化学边界条件及其分布区 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21 (4): 73—78.
- [25] 陈多福, 李绪宣, 夏斌. 南海琼东南盆地天然气水合物稳定域分布特征及资源预测 [J]. 地球物理学报, 2004, 47 (3): 483—489.
- [26] 王宏斌, 张光学, 杨木壮, 等. 南海陆坡天然气水合物成藏的构造环境 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23 (1): 81—86.
- [27] 姚伯初. 南海天然气水合物的形成和分布 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25 (2): 81—90.
- [28] 姚伯初, 吴能友. 天然气水合物——石油天然气的未来替代能源 [J]. 地学前缘, 2005, 12 (1): 225—233.
- [29] 卢振权, 吴必豪, 祝有海. 南海潜在天然气水合物藏的成因及形成模式初探 [J]. 矿床地质, 2002, 21 (3): 232—239.
- [30] 赵生才. 天然气水合物研究现状及我国对策——香山科学会议第 160 次学术讨论会观点摘要 [J]. 地球科学进展, 2002a, 17 (3): 461—464.
- [31] 赵生才. 关于开展中国天然气水合物研究的建议 [J]. 地球科学进展, 2002b, 17 (3): 465—466.
- [32] 何家雄. 天然气水合物研究进展和南海北部勘探前景初探 [J]. 海洋石油, 2003, 23 (1): 57—64.
- [33] 陈多福, 黄永样, 冯东, 等. 南海北部冷泉碳酸盐岩和石化微生物细菌及地质意义 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2005, 24 (3): 185—189.
- [34] CHEN Duo-fu, HUANG Yong-yang, YUAN Xun-lai, et al. Seep carbonates and preserved methane oxidizing archaea and sulfate reducing bacteria fossils suggest recent gas venting on the seafloor in the Northeastern South China Sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 2005, 22: 613—621.
- [35] HAN X Q, SUESS E, HUANG Y Y, et al. Jialong methane reef: First direct evidence of methane seepage in the South China Sea [J]. Geophysical Research Abstracts, 2005, 7: 4 055.
- [36] 陈忠, 颜文, 陈木宏, 等. 南海北部大陆坡冷泉碳酸盐结核的发现: 海底天然气渗漏活动的新证据 [J]. 科学通报, 2006, 51 (9): 1 065—1 072.
- [37] 陆红锋, 陈芳, 刘坚, 等. 南海北部神狐海区的自生碳酸盐岩烟囱——海底富烃流体活动的记录 [J]. 地质论评, 2006, 52 (3): 353—357.
- [38] 陆红锋, 刘坚, 陈芳, 等. 南海台西南区碳酸盐岩矿物学和稳定同位素组成特征——天然气水合物存在的主要证据之一 [J]. 地学前缘, 2005, 12 (3): 268—276.
- [39] SHYU C T, HSU S K, LIU C S. Heat flows off southwest Taiwan: measurements over mud diapirs and estimated from bottom simulating reflectors [J]. TAO, 1998, 9 (4): 795—812.
- [40] CHOW J, LEE J S, SUN R, et al. Characteristics of the bottom simulating reflectors near mud diapirs: offshore southwestern Taiwan [J]. Geo-Marine Letters, 2000, 20: 3—9.
- [41] 沙志彬, 王宏斌, 张光学, 等. 底辟构造与天然气水合物的成矿关系 [J]. 地学前缘, 2005, 12 (3): 283—288.
- [42] 于兴河, 张志杰, 苏新, 等. 中国南海天然气水合物沉积成藏条件初探及其分布 [J]. 地学前缘, 2004, 11 (1): 311—314.
- [43] 张志杰, 于兴河, 刘博. 我国台西南附近构造沉降与沉积作用对气水合物成藏的可能控制 [J]. 天然气地球科学, 2004, 15 (6): 655—659.
- [44] 苏新, 陈芳, 于兴河, 等. 南海陆坡中新世以来沉积物特性与气体水合物分布初探 [J]. 现代地质, 2005, 19 (1): 1—13.
- [45] MCDONNELL S L, MAX M D, CHERKIS N Z, et al. Tectono-sedimentary controls on the likelihood of gas hydrate occurrence near Taiwan [J]. Marine Petroleum Geology, 2000, 17: 929—936.
- [46] 金春爽, 汪集暘, 王永新, 等. 天然气水合物地热场分布特征 [J]. 地质科学, 2004, 39 (3): 416—423.
- [47] JIN Chun-shuang, WANG Ji-yang. A preliminary study on the gas hydrates stability zone in the South China Sea [J].

- Acta Geologica Sinica. 2002, 76 (4): 423—428.
- [48] JIN Chun-shuang, WANG Ji-yang, LU Zhen-quan. The accumulation and Formation of gas hydrate and its geological conditions in the South China Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2002, 22 (2): 89—94.
- [49] 姚伯初. 南海的天然气水合物矿藏 [J]. 热带海洋学报, 2001, 20 (2): 20—28.
- [50] 葛倩, 王家生, 向华, 等. 南海天然气水合物稳定带厚度及资源量估算 [J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2006, 31 (2): 245—249.
- [51] COFFIN R B, GRABOWSKI K S. The role of methane hydrate in ocean carbon chemistry and biogeochemical cycling[C] // MAX M D. Natural gas hydrate in oceanic and permafrost environments. Netherland: Kuwer Academic Publishers, 2000: 77—90.
- [52] 付少英. 烃类成因对天然气水合物成藏的控制 [J]. 地学前缘, 2005, 12 (3): 263—267.
- [53] 吴必豪, 张光学, 祝有海, 等. 中国近海天然气水合物的研究进展 [J]. 地学前缘, 2003, 10 (1): 177—189.
- [54] 孙春岩, 王宏语, 牛滨华. 西沙海槽天然气水合物地球化学勘探 [J]. 地球科学, 2004, 29 (2): 135—140.
- [55] 牛滨华, 孙春岩, 苏新, 等. 勘查地球化学方法适用于勘查天然气水合物的依据 [J]. 现代地质, 2005, 19 (1): 61—66.
- [56] 王宏语, 孙春岩, 黄永祥, 等. 海上气态烃快速测试与西沙海槽天然气水合物资源勘查 [J]. 现代地质, 2002, 16 (2): 180—186.
- [57] 王宏语, 孙春岩, 张洪波, 等. 西沙海槽潜在天然气水合物成因及形成地质模式 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25 (4): 85—91.
- [58] 蒋少涌, 杨涛, 薛紫晨, 等. 南海北部海区海底沉积物中孔隙水的 Cl^- 和 SO_4^{2-} 浓度异常特征及其对天然气水合物的指示意义 [J]. 现代地质, 2005, 19 (1): 45—54.
- [59] 杨涛, 薛紫晨, 杨竞红, 等. 南海北部地区海洋沉积物中孔隙水的氢、氧同位素组成特征 [J]. 地球学报, 2003, 24 (6): 511—514.
- [60] 王建桥, 祝有海, 吴必豪, 等. 南海 ODP1146 站位烃类气体地球化学特征及其意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25 (3): 53—60.
- [61] 祝有海, 饶竹, 刘坚, 等. 南海西沙海槽 S14 站位的地球化学异常特征及其意义 [J]. 现代地质, 2005, 19 (1): 39—44.
- [62] 邓希光, 付少英, 黄永祥, 等. 南海北部东沙群岛 HD196 站位地球化学特征及其对水合物的指示 [J]. 现代地质, 2006, 20 (1): 92—102.
- [63] 杨涛, 蒋少涌, 葛璐, 等. 南海北部陆坡西沙海槽 XS-01 站位沉积物孔隙水的地球化学特征及其对天然气水合物的指示意义 [J]. 第四纪研究, 2006, 26 (3): 442—448.
- [64] 刘坚, 陆红锋, 廖志良, 等. 东沙海域浅层沉积物硫化物分布特征及其与天然气水合物的关系 [J]. 地学前缘, 2005, 12 (3): 258—262.

The research advances of natural gas hydrates in northern South China Sea

DENG Xi-guang , WU Lu-shan , FU Shao-ying , WU Neng-you
(Guangzhou Marine Geological Survey , Guangzhou 510760 , China)

Abstract : Natural gas hydrates are immense amounts of clean- burning potential energy, which is a white ice- like material that naturally occurs under very low temperatures and high- pressure conditions in the continental slope and rise areas and shallow sediments of deep oceans around the globe. They may contain twice as much carbon as all known natural gas, oil and coal deposits and constitute the single largest store of fixed carbon on the earth. 1 m³ of gas hydrate typically contains 164 m³ of methane and 0.84 m³ of water at standard temperature and pressure. Furthermore, current estimates of the amount of gas in the world 's marine and permafrost gas hydrate accumulations are in rough accord at about 20 000 trillion cubic meters. Many countries are enlarging their funds for gas hydrates and hope to exploit hydrate as possible as early. At present, the gas hydrate samples have been collected by USA, Japan, Indian and South Korean.

In China ,the research of hydrates was initiated further later till in the early 1990s , but enormous progresses have been made in geology, geophysics and geochemistry. China government has regarded continental slope of northern South China Sea as first area of drilling the natural gas hydrate. In May, 2007, gas hydrate samples have been collected by China in Shenhu area of northern South China Sea. This is the first time in South China Sea, that confirm that there is abundant hydrate in northern South China Sea, and indicate that gas hydrate research of China has advanced in the world. Meanwhile, northern South China Sea will become a strategical area of gas hydrate exploitation.

The paper is aimed at giving a brief overview on the investigations and research of hydrate in northern South China Sea in last decade ,and the progresses on geology, geophysics and geochemistry of gas hydrate in recent have been summarized. In geological aspect, the geological condition of the region shows that the P- T condition, gas source condition and tectonic setting could provide suitable thermodynamic condition for the formation of gas hydrates in northern South China Sea, moreover, the landform and relief related with hydrate have been found during survey, and Seep carbonates have been found in several sites in northern South China Sea. According to geophysical evidences, typical bottom- simulating reflectors(BSR) have been identified in some areas of northern South China Sea, and other geophysical evidences have also been recognized, such as amplitude blanking zone, the P- wave velocity abnormality and polarity reversion of the waveform, etc. Furthermore. The geochemical characteristics of sediments and pore water of sediments in northern South China Sea are similar to the feature of sediments and pore water of sediments in typical hydrate- bearing area. All these evidences indicate that the huge resource of gas hydrates have been held under the seafloor in northern South China Sea. At last, exploited direction and suggestions future gas hydrate researches have been proposed in China.

Key words : research advances ; natural gas hydrate ; northern South China Sea