DOI:10.19826/j. cnki. 1009-3850. 2021. 12001

# 中国天然气水合物资源潜力及试开采进展

祝有海1, 庞守吉1, 王平康1,2, 张 帅1, 肖 睿1

(1. 中国地质调查局油气资源调查中心,北京 100083;2. 中国地质调查局,北京 100037)

**摘要:**中国高度重视天然气水合物资源的调查研究。自上世纪90年代中期开始先后经历了资源预测、调查、试采三 个发展阶段,迄今已在南海神狐、东沙、琼东南、台西南斜坡及祁连山木里地区发现水合物样品5处,在南海、东海冲 绳海槽及青藏高原发现地质、地球物理、地球化学等赋存标志7处,显示出良好的资源前景。综合多位学者的估算结 果,中国天然气水合物的资源量约126×10<sup>12</sup>m<sup>3</sup>,是中国常规天然气资源量的2倍,资源潜力巨大。自2011年起,先 后在祁连山木里地区和南海神狐地区进行了5次天然气水合物试验性开采,累计产气量达117×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>,且使得位于 "金字塔"塔基且规模巨大的细粒储层中的水合物也有可能成为开发利用对象。中国是能源短缺国家,如何尽快开 发利用这一规模巨大的潜在能源,需要全方位、多层次地开展各项调查研究,并进行技术、经济和环境评价,加快商 业化开发进程,使这一潜在能源能在不久的将来真正造福于社会。

关键 词:天然气水合物;资源量;试采;中国

中图分类号:P618.13 文献标识码:A

0 引言

天然气水合物是低温高压条件下由气体与水 形成的固体类冰状物质,主要产于海底沉积物和陆 上永久冻土带中。这是一种新型潜在能源,全球资 源量达2.1×10<sup>15</sup>m<sup>3</sup>,具有巨大的能源潜力,并有重 要的环境及地质灾害意义,引起世界各国的高度关 注(Kvenvolden,1988;Milkov,2004)。中国政府也高 度重视天然气水合物的调查研究,其中中国地质调 查局主导资源调查评价、试采及配套研究工作,取 得了一系列重要进展(张洪涛等,2007;张洪涛和祝 有海,2011)。近年来,中国在天然气水合物调查发 现、资源评价及试采方面进展神速,本文试图简要 总结这方面的主要成果,供国内外同行参考。

1 发展简史

人们认识天然气水合物已有 200 多年的历史, 大致经历了发现和实验室合成、管道堵塞及防治、 资源调查、开发利用四个阶段。目前世界各国天然 气水合物调查研究的重点仍集中于发现产地、确定 产状和解释成因,进而计算资源量,只有部分国家 开展试生产研究,且进展喜人,研究重点逐渐从资 源调查转向开发利用。预计在解决了开发技术难 题后,在开发动力(包括经济动力和政治动力)的推 动下最终实现商业化利用(Collett,2002)。

中国对天然气水合物的调查研究起步较晚,20 世纪80年代初才有少量学者关注国际天然气水合 物的调查研究动态,并将相关成果介绍到国内(史 斗和郑军卫,1999)。随后资源领域的发展大致经 历了三个阶段(图1),90年代中晚期为资源预测阶 段,我国部分学者对南海、青藏高原天然气水合物 的形成条件、异常标志及找矿前景进行了初步研究 和预测(姚伯初,1998;徐学祖等,1999)。1999年, 广州海洋地质调查局对南海西沙海槽进行天然气 水合物首次地球物理调查,发现与天然气水合物有 关的地球物理标志——Bottom Simulating Reflection (BSR),开启了中国天然气水合物资源调查阶段,特 别是自2002 年开始实施的"我国海域天然气水合 物资源调查与评价"国家专项及其他项目,对我国 南海、东海、陆域冻土区开展了系列资源调查工作, 相继于2007年及2008年在南海神狐地区、祁连山 木里地区钻获天然气水合物实物样品(Zhang et al.,

收稿日期: 2020-11-26; 改回日期: 2021-08-24

作者简介: 祝有海(1963—),男,研究员,主要从事天然气水合物调查研究。E-mail: 1768210693@ qq. com 资助项目: 中国地质调查局"陆域天然气水合物资源综合调查"(DD 20190102)项目资助

2007;祝有海等,2009),取得了找矿发现的重大突破。2011年开始实施的"天然气水合物资源勘查与试采工程"国家专项,除对我国海域、陆域冻土区继续开展资源调查外,重点转向试采领域,分别于2011年和2016年对祁连山成功实施了两次陆域水

合物试采工程,2017 年和 2020 年先后三次对南海 神狐地区成功实施海域水合物试采工程,取得试采 领域的重大突破,由此进入资源试采阶段。预计在 攻克一系列技术、经济和环境难题后,有望在 2030 年前后实现商业化利用。



图1 中国天然气水合物资源调查开发历程示意图

Fig. 1 Sketch showing resource investigation and development history of China's natural gas hydrates

表1	中国天然气水合物产地简表
----	--------------

Table 1 Overview of China's natural gas hydrate occurrence	Table 1	Overview o	of China'	's natural	gas hydrate	occurrences
--	---------	------------	-----------	------------	-------------	-------------

区域	编号	产地	主要标志	主要特征	文献	
海域 -	1	南海神狐	样品	呈结核状、脉状、层状和分散状产出,分布水深 900~1500m,产	杨胜雄等(2017)	
				于 150 ~ 300 mbsf,分布广、厚度大、饱和度高		
				呈块状、层状、结核状、脉状和分散状产出,分布水深 600~		
	2	南海东沙	样品	1100m,上矿层产于0~90mbsf,下矿层产于91~226mbsf,厚约	张光学等(2017)	
				6~37m,埋藏浅、厚度大、类型多、饱和度高		
	3	南海台西南斜坡	样品	块状、脉状,埋深浅,产于近海底浅表层沉积物中	Huang et al. (2021)	
	4	南海西沙海槽	BSR、冷泉、			
	4		地球化学		办	
	5	南海琼东南海 马冷泉	样品	呈块状、层状、结核状、脉状和分散状产出,分布水深 1350~	苏丕波等(2017);	
				1430m,产于海底浅表层沉积物中,埋深0.15m 至数米	Wei et al. (2019)	
	6	南海南沙海槽	BSR		Berner et al. (1990)	
	7	南海文莱一	BSR、测井、		Mc Connell et al.	
	/	沙巴盆地	地球化学		(2012)	
	8	南海万安盆地	BSR、地球化学		Trung et al. (2012)	
	0	东海冲绳海槽	BSR、冷泉、泥		休井子(2014)	
	9		火山、地球化学		陈建义(2014)	
陆域				产于冻土层之下,埋深133~396m,呈薄层状、片状、团块状产		
	10	青海木里	样品	于岩石裂隙中,或以浸染状产于砂岩孔隙中,埋深浅、冻土层	祝有海等(2009)	
				薄、气体组分复杂		
你土区	11	青海昆仑山垭口	测井、地球化学		吴青柏等(2015)	
	12	青海乌丽	测井、地球化学		刘晖等(2019)	

526

# 2 天然气水合物分布特征

目前已在中国南海、东海及青藏高原发现天然 气水合物样品5处,发现地质、地球物理、地球化学 等赋存标志7处(表1、图2),并在其他地区发现一 系列异常标志。







#### 2.1 南海

南海是西太平洋地区最大的边缘海,总面积约 350×10<sup>4</sup>km<sup>2</sup>,绝大部分陆坡均具有形成天然气水合 物的温压条件及气源条件,面积约 126.4  $\times$  10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>。 Hinz et al. (1989)最早报道了南海存在与天然气水 合物有关的 BSR,姚伯初(1998)利用已有地震资料 在东沙和西沙海槽识别出 BSR。1999 年广州海洋 地质调查局在西沙海槽的首次调查发现了 BSR,随 后在南海北部的西沙海槽、东沙群岛南部、神狐地 区及琼东南盆地开展了地质、地球物理、地球化学 调查,完成高分辨率多道地震16.7×10<sup>4</sup>km,钻探井 88 口,共发现 BSR 分布区 26 处, 圈定 11 个有利远 景区,分布面积达 32750km<sup>2</sup>(苏丕波等,2017;梁金 强等,2016)。2007年起中国地质调查局组织实施 了4次天然气水合物钻探工程,先后在神狐、东沙和 琼东南等地获得了水合物实物样品(Zhang et al., 2007; Yang et al., 2017)

神狐地区位于珠江口盆地珠二坳陷,海底地形

复杂,新生代以来构造运动活跃,沉积速率较大,油 气资源丰富,是形成天然气水合物的有利地区。广 州海洋地质调查局先后于 2007 年(GMGS1)、2015 年(GMGS3)和 2016 年(GMGS4)在神狐海域进行天 然气水合物钻探,发现了结核状、脉状、薄层状、厚 层状和分散状等多种水合物(图 3A)。水合物分布 水深为 900~1500m,产于海底以下 150~300m,含 水合物层厚 18~34m,最厚达 80m,水合物饱和度 20%~43%,最大达 75%。该区水合物具有分布 广、厚度大、饱和度高等特点(杨胜雄等,2017;苏丕 波等,2017)。

东沙地区位于珠江口盆地东部,水深 300~ 2000m,海底地形复杂,也是形成天然气水合物的有 利地区。2004年,中德两国开展了为期42天的SO -177 航次联合调查,在东沙群岛附近地区发现了 世界上最大的冷泉碳酸盐岩——九龙甲烷礁 (Jiulong Methane Reef, 面积近 430km<sup>2</sup>), 并发现了大 量与天然气水合物有关的地质、地球化学和生物学 证据,如极浅的硫酸盐/甲烷界面(SMI)、化能生物 群等,显示下部应有天然气水合物存在(黄永样等, 2008)。2013年,广州海洋地质调查局在东沙海域 实施了钻探(GMGS2),发现了块状、层状、结核状、 脉状和分散状天然气水合物(图 3B、图 3C)。水合 物赋存于水深 600~1100m 处,具有埋藏浅、厚度 大、类型多、饱和度高等特征。值得一提的是,该区 发现上下两个水合物层,其中上水合物层发育于海 底以下0~90m范围内,水合物多呈块状、脉状、结 核状产出或充填在细粒沉积物裂隙中,厚约15~ 32m, 饱和度 10%~33%; 下水合物层发育于海底以 下 91~226m 范围内,水合物呈分散状产出,厚约 6 ~37m, 饱和度一般为10%~33%(张光学等, 2017; Sha et al., 2015).

2015年,广州海洋地质调查局通过"海马"号潜水器,在琼东南盆地发现了活动性冷泉"海马冷泉"。该冷泉总体呈东西向条带状展布,水深1350~1430m,面积约350 km<sup>2</sup>。冷泉区浅层沉积物中赋存有天然气水合物,重力柱状取样器在 ROV1 和 ROV2 站位海底以下数米处即采获水合物样品,最浅仅为0.15m。此外,该区还发现大量自生碳酸盐岩和冷泉生物群,包括结核状、结壳状和层状自生碳酸盐岩和管状蠕虫、蛤类及贻贝等多种冷泉生物(苏丕波等,2017)。2018年,广州海洋地质调查局在琼东南盆地实施了钻探航次(GMGS5),发现了块



#### 图 3 中国采获的天然气水合物样品

A. 南海神狐分散状水合物在水中强烈冒泡(Zhang et al., 2007); B. 南海东沙块状水合物(Zhang et al., 2014); C. 南海东沙脉状水合物样品 (Zhang et al., 2014); D. 南海琼东南盆地块状水合物样品(Wei et al., 2019); E. 台湾西南斜坡块状水合物样品(Huang et al., 2021); F. 青海木 里裂隙面上的水合物(祝有海等, 2009)

Fig. 3 Photos showing natural gas hydrate samples obtained in China

状(图 3D)、层状、结核状、脉状和分散状水合物样品,水合物饱和度0~63%(Wei et al., 2019)。

台湾西南斜坡也是形成天然气水合物的有利地区,由于南海板块俯冲于吕宋岛弧之下并与之碰撞,形成以恒春海脊为代表的叠瓦状增生楔,其上发现了面积达2×10<sup>4</sup>km<sup>2</sup>的BSR,并推测该区域存在天然气水合物(Chi et al., 1998; Reed et al., 1992; Chow et al., 2000)。2018年,台湾利用法国R/V Marion Dufresned 调查船上的大型活塞取样器在台湾西南斜坡的两个站位上采到块状水合物样品(图3E),其中一个产于海底之下约5.5m处,另一个产于气烟囱附近的近海底处(Huang et al., 2021)。

西沙海槽位于西沙群岛的北部,是一近东西向 的弓形海槽,长约430km,槽底宽6~14km,水深 1500~3400 m,有利于形成天然气水合物。1999年 10月,广州海洋地质调查局在西沙海槽发现典型的 BSR标志,面积达5700km<sup>2</sup>,BSR分布于海底之下 180~750m,其上发育厚约80~620m的振幅空白带 (苏丕波等,2010)。随后该区发现一系列地质、地 球化学标志,如冷泉碳酸盐、孔隙水异常、烃类气体 异常等,找矿前景良好。

南海南部特别是南沙海槽、曾母盆地、巴拉望

盆地具有良好的天然气水合物形成条件,其中南沙 海槽为 NE-SW 向的深海槽,水深 2800~2900m,油 气资源丰富。国外对南沙海槽天然气水合物的调 查研究较早,Hinz et al. (1989)利用巴拉望一沙巴 外海采集的多道地震资料进行处理分析,最早报道 了南沙海槽存在 BSR,Berner and Faber(1990)再次 报道了在南沙海槽识别出 BSR。随后,比较浅的 SMI、甲烷含量异常、自然铝等可能与天然气水合物 分解有关的地质地球化学标志相继被报道(陈忠 等,2007),显示出南沙海槽可能存在天然气水 合物。

此外,在文莱一沙巴盆地的 Gumusut-Kakap 深水油气区中也发现有 BSR,在钻穿水合物层位时泥浆池中有气泡释出,并伴随有测井响应,推测有水合物存在。BSR 产于海底之下 150~180m 处,侧向连续分布,测井证据显示水合物层厚约 150m,饱和度 20%~50% (McConnell et al., 2012)。

南海西南部也广泛发育有 BSR,如万安盆地、曾母盆地等。BSR 通常产于海底之下数百米处的上新统—第四系沉积物中,水深 1200~3000m,且往往与底层水水溶甲烷异常相伴生,显示也有可能存在天然气水合物(Trung et al., 2012)。

#### 2.2 东海冲绳海槽

东海冲绳海槽是西太平洋沟 - 弧 - 盆体系中

的一个弧后盆地,长约1200km,宽100~230km,面 积约22×10<sup>4</sup>km<sup>2</sup>。初步研究结果显示,冲绳海槽特 别是其北侧槽坡具备形成天然气水合物的温压、气 源及构造条件。多道地震资料显示冲绳海槽存在 有较为可靠的BSR、振幅空白带、极性反转、速度反 转等地球物理标志,BSR 主要分布于冲绳海槽南 部,中部次之,北部较少,其分布水深一般在300~ 1500m,多位于海底之下380~470m(方银霞等, 2001;徐宁等,2006)。此外,冲绳海槽还发现一些 与水合物有关的地质、地球化学标志,如海底冷泉、 泥火山、底层海水烃类异常、碳酸盐结核、自生黄铁 矿等,并在冲绳海槽中部的JADE 热液活动区发现 CO<sub>2</sub>水合物(Sakai et al., 1999),显示出良好的天然 气水合物找矿前景。

### 2.3 青藏高原

中国是世界上第三冻土大国,在青藏高原和大 兴安岭地区存在着大片冻土区,多年冻土面积达 215×10<sup>4</sup>km<sup>2</sup>(周幼吾等,2000)。鉴于冻土区天然 气水合物的重要意义,中国地质调查局自2002开始 对我国冻土区天然气水合物的成矿条件、异常标志 和找矿前景开展调查研究,迄今已在青藏高原发现 水合物产地一个,推测产地两个。

祁连山木里地区的天然气水合物发现于 2008 年,是世界上第一个在中纬度高山冻土区发现的天 然气水合物。水合物均产于冻土层之下,埋深 133 ~396m,主要赋存于中侏罗统江仓组,水合物以薄 层状、片状、团块状赋存于粉砂岩、泥岩、油页岩的 裂隙面中(图 3F),或是以浸染状赋存于细粉砂岩的 孔隙中。水合物中的气体组分较为复杂,除甲烷外 还含有较高的乙烷、丙烷等重烃组分,部分样品甚 至还含有一定量的 CO<sub>2</sub>,为一种较为罕见的水合物 (祝有海等,2009)。

昆仑山垭口盆地为上新世一中更新世断陷盆 地,面积约50km<sup>2</sup>,沉积了约600m厚的新近纪—第 四纪沉积物。2013年施工的昆钻3井(KZ-3),发现 了一系列天然气水合物赋存的证据,如在250m以 下的多个岩层中发现大量气体释放现象,甲烷含量 达22%~32%,且具有天然气水合物分解的间歇性 释放特征。这些气体释放层位还伴有密度降低、侧 向电阻率和声波波速增大等测井标志,并发现有与 水合物分解有关的自生碳酸盐、黄铁矿等自生矿物 标志,显示这一地区可能赋存有天然气水合物(吴 青柏等,2015)。 2015年,青海南部乌丽地区 TK-2 孔于 52 ~ 241m间的二叠系那益雄组岩心中,发现有强烈冒泡、"冒汗"现象(水合物分解后释放出气体和水),并有红外低温异常、点火助燃等标志,测井曲线上呈现出密度降低、声波速度增大、侧向电阻率增高等标志,并有泄气构造、自生矿物及盐析现象等,具有明显的天然气水合物赋存标志。此外,2016 年施工的 TK-3 孔气测录井结果显示,在那益雄组多层段发现丰富 CO<sub>2</sub>显示,CO<sub>2</sub>含量最高达 91.09%,平均为 31.03%,暗示该地区有可能存在 CO<sub>2</sub>水合物(刘晖等,2019)。

## 3 天然气水合物资源潜力

天然气水合物资源量(Resources)是指地层(沉 积物)中所蕴藏的水合物资源总量,不管发现与否 以及能否被开发利用。依据工作程度可将资源量 分成已发现资源量(Identified Resources)和待发现 资源量(Undiscovered Resources)两部分,并可进一 步细分成潜在(Speculative)资源量、理论 (Hypothetical)资源量、推测(Inferred)资源量、推定 (Indicated)资源量、可采(Probable)资源量和探明 (Proved)资源量等(图4)。储量(Reserves)则指经 过合理评价得出的有经济开发价值的天然气水合 物量,依地质工作程度可细分成推测(Inferred)储 量、推定(Indicated)储量、可采(Probable)储量和探 明(Proved)储量等(Milkov,2004)。



#### 图 4 天然气水合物资源潜力评估术语及其实例

Fig. 4 Evaluation terms and examples of the resource potential of natural gas hydrates

Table 2	Resource estim	ates of natural gas	hydrates in China
区域	地区	资源量(m <sup>3</sup> )	文献来源
	南海海域	64. 3 $\times 10^{12}$	姚伯初(2001)
	南海海域	64. 9 × 10 <sup>12</sup>	梁金强等(2006)
	南海海域	$6 \times 10^{12}$	葛 倩等(2006)
	南海海域	$138 \times 10^{12}$	Trung et al (2012)
	南海海域	69. 3 × 10 <sup>12</sup>	于兴河等(2019)
	琼东南盆地	1. $6 \times 10^{12}$	陈多福等(2004)
	琼东南盆地	5. 7 × 10 <sup>12</sup>	刘杰等(2019)
	南海北部	$15 \times 10^{12}$	Wu et al(2005)
南海	南海北部	$63 \times 10^{12}$	卢振权等(2007)
	南海南部	23. 2 × 10 <sup>12</sup>	王淑红等(2005)
	南海南部	$(17.3 \sim 22) \times 10^{12}$	曾维平等(2003)
	白云凹陷及周边	$(8.7 \sim 60.4) \times 10^{12}$	张树林(2007)
	台西南盆地	$(2.3 \sim 13.8) \times 10^{12}$	毕海波等(2010)
	台西南盆地	1. $6 \times 10^{12}$	Chung et al(2016)
	神狐地区	$1.6 \times 10^{10}$	Wu et al(2010)
	神狐地区	$1.0 \times 10^{11}$	王秀娟等(2010)
	东沙地区	$(1.0 \sim 1.5) \times 10^{11}$	沙志彬等(2015)
	冲绳海槽	24. 1 $\times 10^{12}$	方银霞等 (2001)
大海	冲绳海槽	$(2.0 \sim 9.9) \times 10^{12}$	杨文达等 (2004)
尔西	冲绳海槽	32. $6 \times 10^{12}$	唐勇等(2005)
	冲绳海槽	$24 \times 10^{12}$	陈建文(2014)
	中国陆域	$38\sim75\times10^{12}$	祝有海等(2010)
	中国陆域	$(3.0 \sim 5.1) \times 10^{12}$	Wang et al. (2018)
17+1-1-11	青藏高原	$(0.12 \sim 240) \times 10^{12}$	陈多福等(2005)
西或 本土豆	青藏高原	$(4.5 \sim 298) \times 10^{12}$	库新勃等(2007)
小工区	木里煤田	$(2.71 \sim 2.99) \times 10^{11}$	徐水师等(2009)
	木里钻探区	9. $42 \times 10^5$	卢振权等(2010)
	木里三露天	2. $14 \times 10^{6}$	李永红等(2015)

表 2 中国天然气水合物资源潜力估算表

姚伯初(2001)运用体积法对南海天然气水合 物资源量进行估算,结果约为  $64.3 \times 10^{12} \, \text{m}^3$ 。随 后,其他学者也用体积法对南海或其局部地区的水 合物资源量进行计算(表2、图5),其中南海北部天 然气水合物资源量约为 15 × 10<sup>12</sup> m<sup>3</sup> (Wu et al., 2005), 南海南部约为23.2×10<sup>12</sup> m<sup>3</sup>(王淑红等, 2005),琼东南盆地约为1.6×10<sup>12</sup>m<sup>3</sup>(陈多福等, 2004)。梁金强等(2006)则利用"概率统计法"对南 海天然气水合物资源潜力进行了估算,结果表明在 90% 概率下约为 7.6 × 10<sup>12</sup> m<sup>3</sup>, 在 50% 概率下约 64.9×10<sup>12</sup>m<sup>3</sup>,在10% 概率下约195.1×10<sup>12</sup>m<sup>3</sup>,其 中值与前人用"体积法"的预测结果基本相当。葛 信等(2006)运用 Visual Basic Net 编程分析南海水 合物稳定带得出的水合物资源量约为6×10<sup>12</sup> m<sup>3</sup>, 比大多数学者的估算结果低了一个数量级。

东海冲绳海槽天然气水合物的资源量也较为 可观,方银霞等(2001)依据稳定带计算出的资源量 约为24.1×10<sup>12</sup>m<sup>3</sup>,陈建文(2014)的估算结果与此 类似。唐勇等(2005)也利用稳定带分别计算了南 区资源量为18.9×10<sup>12</sup>m<sup>3</sup>、中区为3.3×10<sup>12</sup>m<sup>3</sup>、北 区为10.4×10<sup>12</sup>m<sup>3</sup>,总资源量为32.6×10<sup>12</sup>m<sup>3</sup>。杨 文达等(2004)则根据 BSR 等异常标志估算出东海 陆坡区的资源量为(1.97~9.86)×10<sup>12</sup>m<sup>3</sup>,比前两 者低一个数量级。





陆域冻土区的估算结果差异较大,陈多福等 (2005)依据稳定带估算的青藏高原资源量为(0.12 ~240) × 10<sup>12</sup> m<sup>3</sup>, 库新勃等(2007) 估算的结果为 (4.5~298)×10<sup>12</sup>m<sup>3</sup>。祝有海等(2011)运用体积 法估算出的青藏高原天然气水合物资源量为(10.8 ~90.7) ×10<sup>12</sup>m<sup>3</sup>,运用蒙特卡罗法估算出的资源量 则为(21.9~153)×10<sup>12</sup>m<sup>3</sup>,综合体积法和蒙特卡罗 法后青藏高原的资源量约为70×10<sup>12</sup>m<sup>3</sup>,东北漠河 盆地资源量约为5.5×10<sup>12</sup>m<sup>3</sup>,我国冻土区总资源量 约为75.5×10<sup>12</sup>m<sup>3</sup>。最近, Wang et al. (2018)也估算 了我国陆域冻土区的水合物资源量为(3.5~5.1)× 10<sup>12</sup>m<sup>3</sup>,其中青藏高原为(1.7~2.8)×10<sup>12</sup>m<sup>3</sup>,东北 漠河盆地为(0.5~0.8)×10<sup>12</sup> m<sup>3</sup>,西北地区为1.2× 10<sup>12</sup>m<sup>3</sup>,比其他学者的估算结果低了一个数量级。

综合上述各家估算结果,南海天然气水合物资 源量约为64×10<sup>12</sup>m<sup>3</sup>,东海冲绳海槽约为24×10<sup>12</sup> m<sup>3</sup>,陆域冻土区的保守资源量约为38×10<sup>12</sup>m<sup>3</sup>,全 国合计约为126×10<sup>12</sup>m<sup>3</sup>,这一结果显示我国具有 巨大的天然气水合物资源潜力,约是我国常规天然

气资源量(63×10<sup>12</sup>m<sup>3</sup>;李建忠等,2012)的2倍,占 全球天然气水合物总资源量的0.60%。

以上只是根据天然气水合物稳定带或 BSR 及 地质、地球化学证据推算的天然气水合物资源量, 最多只能达到推测资源量量级。2007年后分别在 南海神狐、东沙和祁连山木里地区钻获天然气水合 物样品,据此就可根据钻探取心、测井、原位温度和 孔隙水等详细测试资料,能较准确地确定天然气水 合物的分布特征及有关参数,进而更准确地计算天 然气水合物资源量,如Wu et al. (2010)根据神狐钻 探区的各种参数(水合物分布面积15km<sup>2</sup>,含水合物 层厚度 10~40m, 沉积物孔隙度 55%~65%, 水合 物饱和度 20%~48%等),认为在概率为 50%条件 下,神狐钻探区的资源量约为160×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>。王秀娟 等(2010)则依据钻探结果,对神狐约 350km<sup>2</sup>的 BSR 分布区进行估算,结果表明水合物资源量约为1.03 ×10<sup>11</sup>m<sup>3</sup>。沙志彬等(2015)则通过东沙地区 23 个 钻孔圈定的55 km<sup>2</sup>内水合物资源量进行估算,结果 为 $(1.0 \sim 1.5) \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。卢振权等(2010)依据祁 连山木里地区较详细的钻探数据,计算 0.04km<sup>2</sup>钻 探区内孔隙中的水合物资源量约为  $6.24 \times 10^4 \text{ m}^3$ , 裂隙中的资源量约为88×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>,总资源量约为 94.2×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>。李永红等(2015)则依据进一步的钻 探成果,对木里三露天地区两个块段(面积分别为 0.6 km<sup>2</sup>和 0.25 km<sup>2</sup>)进行了评价,其资源量约为 213.85×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>。以上局部钻探地区的各种参数较 为准确,钻孔数量也较多,所计算的资源量能达到推 定资源量级,甚至可达到可采资源量或探明资源量级。

# 4 天然气水合物试开采

目前国际上先后在俄罗斯麦索雅哈、加拿大马 更些三角洲、中国祁连山、美国阿拉斯加北坡冻土 区和日本南海海槽、中国南海神狐地区进行过开采 试验(图6、表3)。俄罗斯麦索雅哈气田早在1969 年就用减压法和注入化学试剂法(如甲醇和 CaCl,) 对水合物进行开发,是目前世界上唯一的商业化开 发案例,并稳产至今(Makogon et al., 2007)。但麦 索雅哈案例只是常规气田开发时的意外收获,常规 天然气的开发降低了储层压力,促使上覆水合物层 分解。加拿大麦肯齐三角洲的 Mallik 地区则是第一 个进行水合物开采试验的地区,2002年的第一次试 采,通过向井中注入约80℃的钻井液来分解水合 物,123.65 小时内共产气 516 m<sup>3</sup>,具有天然气水合 物开发利用史上的里程碑意义。2007 年在 Mallik 地区采用减压法进行了第二次试采,但因出砂问题 只持续了不到一天就不得不终止。2008年采用减 压法进行第三次试采,连续生产了6天,总产量达到 1.3 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>, 显示出减压法试采的良好前景 (Yamamoto and Dallimore, 2008)。2012 年在美国阿 拉斯加北坡 Ignik Sikumi 地区成功进行了 CO,置换



图 6 全球天然气水合物试采地分布图 Fig. 6 Map showing locations of test production of global natural gas hydrates

法试采,30 天的试采共采获气体约 2.4 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> (Boswell et al,2018)。2013 年,日本在其东南部的 南海海槽进行了世界上首次海域水合物试采,运用 降压法连续生产了 6 天,总产气量 12 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> (Konno et al,2017),但因出砂严重不得不提前结束 试采。2017年,日本在南海海槽进行了第二次试 采,两口井共试采 36天,产气量为 23.5×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> (Yamamoto et al., 2019)。

	表 3	全球天然气水合物试采状况简表
Table 3	Overview	of test production of global natural gas hydrates

区域	试采地点	试采时间	试采方法	试采井型	试采时长	最高日产量(m <sup>3</sup> )	总产气量(m <sup>3</sup> )	参考文献
	俄罗斯麦索雅哈	1971	降压+注入化学试剂		断续生产 40 余 年			Makogon et al.
	加拿大马更些	2002	加热	单直井	123.65h		516	Vanagara at al
		2007	降压+加热	单直井	12.5h		830	
陆域		2008	降压	单直井	6.8d(139h)		$1.3 \times 10^{4}$	(2008)
冻土区 -	中国青海木里	2011	降压+加热	单直井	101h		95	
		2016	降压	水平井	23d	136.6	1078.4	祝有海等(2020)
				(3井对接)				
	美国阿拉斯加	2012	CO2置换+降压	单直井	30d	5000	2.4×10 <sup>4</sup>	Boswell et al.
海域 -		2013	降压	单直井	6d	$2 \times 10^{4}$	$12 \times 10^{4}$	Konno et al. (2017)
	日本南海海槽	2017	降压	直井	12+24d	8330	$23.5 \times 10^{4}$	Yamamoto et al.
				(2 井)				(2019)
		2017	降压	单直井	60d	$3.5 \times 10^{4}$	$30.9 \times 10^{4}$	Ye et al. (2018)
	中国南海神狐	2017	固态硫化法	直井	10d		81	周守为等(2017)
		2020	降压	水平井	30d	日均 2.87×10 <sup>4</sup>	$86.14 \times 10^4$	叶建良等(2020)



图 7 中国天然气水合物试采点火燃烧照片

A. 2011 年祁连山木里地区单直井试采; B. 2016 年祁连山木里地区水平对接井试采; C. 2017 年南海神狐海域直井试采; D. 南海神狐海域水平 井试采

#### 4.1 祁连山木里地区试采

2011年9—10月,我们用降压法和加热法对祁 连山木里地区天然气水合物进行了试采。本次试 采采用单直井方案,在DK-8试采孔确定水合物产 出层位后,安装开采套管(花管)并固井止水,然后 在井底安装高压潜水泵,对井深146~305m间的水 合物层进行分层试采。试采过程中,启动孔底潜水 泵进行排水,随着水位的降低,水合物储层的压力 下降,促使水合物分解释放出甲烷气体(图7A),然 后在地表回收。降压试采结束后,采用电磁加热、 太阳能加热和水蒸气加热等方法进行试采。试采 共断续进行9天,累计101小时,产气量为95m<sup>3</sup>。

2016年10—11月,为提高开采效率和产气量, 我们运用"山"字形水平对接井对祁连山木里地区 的天然气水合物进行再次试采,由1口主井(SK-0) 和水平距达629.7m的2口分支井(SK-1和SK-2) 组成(图8),试采目标层为地下350m处的水合物 富集层,试采方法为排水降压法。试采分两个阶段 进行,累计生产23天,总产气量1078.4m<sup>3</sup>,最高日 产量136.55m<sup>3</sup>(图7B)。与2011年的单井试采相 比,水平井试采产量明显提高,说明水平井是提高 产量的有效方法。





Fig. 8 Diagram showing structure of an epsilon-shaped horizontally butted well in the Muli area of Qilian Mountain

#### 4.2 南海神狐地区试采

2017年5—7月,中国地质调查局优选南海神 狐地区实施海域水合物首次试采,由"蓝鲸一号"平 台实施,试采井位 SHSC-4井水深 1266m,试采目标 层为海底以下 203~277m 间的粉砂质黏土、黏土质 粉砂储层。自 2017年5月10日开始试采点火(图 7C),至7月9日主动关井,共连续试采 60天,总产 气量 30.9×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>,平均日产量 0.52×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>,最高 日产量达 3.5×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>(Ye et al., 2018)。本次试采 取得了持续产气时间最长、产气总量最大的世界纪 录,使我国水合物试采技术跃居世界前列。

针对南海非成岩天然气水合物的赋存特点,周 守为等(2019)提出固态流化试采方案,其核心思想 是将浅层非成岩天然气水合物矿体通过机械破碎 流化转移到密闭的气、液、固多相举升管道内,利用 举升过程中海水温度升高、静水压力降低的自然规 律使水合物逐步气化,实现深水浅层天然气水合物 安全试采。基于这一机理于2017年5月25日在南 海北部荔湾3站位(邻近前述神狐地区SHSC-4试 采井),对水深1310m、埋深117~196m处的水合物 矿层进行了为期10天的试采,产气量为81 m<sup>3</sup>(周 守为等,2017)。随后,周守为院士等提出加强天然 气水合物、浅层气、常规油气等三气合采的新思路。

中国地质调查局于2019年10月—2020年4月 对南海神狐地区水深1225m的水合物层进行了第 二次试采。本次试采攻克了钻井井口稳定性、水平 井定向钻进、储层增产改造与防砂、精准降压等一 系列深水浅软地层水平井技术难题,采用水平井开 采技术,大大增加了井眼与储层的接触面积,实现 连续试采30天,总产气量86.14×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>,日均产气 2.87×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>,是首次试采日产气量的5.57倍,大大 提高了日产气量和产气总量(图7D)。试采监测结 果表明,整个试采过程海底、海水及大气甲烷含量 无异常(叶建良等,2020)。

最值得关注的是,神狐地区的试采目标层是极 细粒的泥质粉砂储层,具有低孔隙度、低渗透率等 特点,且松软易塌,技术难度远极大。本次试采是 世界水合物开发利用史上的一项重大突破,有可能 改变水合物资源开发利用"金字塔"的结构版图(图 9)。传统上一直认为位于金字塔塔尖上的冻土区 砂质储层中的水合物开采前景最好,海底砂质储层 中的水合物次之,而海底泥质粉砂储层中的水合物 因低孔隙度、低渗透率开采难度极大(Boswell and Collett,2006)。本次试采有可能使得位于金字塔塔 基且资源量巨大的水合物成为未来的开发对象。



图 9 天然气水合物资源金字塔分类示意图(据 Boswell and Collett, 2006 修改)

Fig. 9 Diagrammatic sketch showing the pyramid classification of natural gas hydrate resources

## 5 结语

中国是能源短缺国家,天然气水合物具有巨大的能源潜力,尽管对其的调查研究起步较晚,但近期在资源调查、试采方面进展神速,部分领域已跃居世界前列。天然气水合物的开发利用既是机遇,也是挑战,如何尽快开发这一规模巨大的潜在能源,缓解中国能源供应紧张的局面,需要我们全方位、多层次、多学科地开展各项调查研究,近期宜继续加大资源调查力度,尽快查明资源家底,同时加强试采技术研究并进行经济和环境评价,加快商业化开发进程,使这一潜在能源能在不久的将来真正造福于人类社会。

#### 参考文献(References):

- Berner U, Faber E, 1990. Hydrocarhon gases in surface sediments of the South China Sea [M] // in Jin X L. Marine Geology and Geophysics of the South China Sea. Beijing: China Ocean Press: 199 – 211.
- Boswell R, Collett T, 2006. The gas hydrates resource pyramid [J]. Fire in the Ice: Methane Hydrate Newsletter, 6(3): 5-7.
- Boswell R, Schoderbek D, Collett T S, et al., 2017. The Ignik Sikumi field experiment, Alaska North Slope: design, operations, and implications for CO<sub>2</sub> - CH<sub>4</sub> exchange in gas hydrate reservoirs [J]. Energy & Fuels, 31: 140 - 153.
- Chi W C, Donald L R, Liu C S, et al., 1998. Distribution of the bottomsimulating reflector in the offshore Taiwan collision zone [J]. Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, 9 (4): 779-794.
- Chow J, Lee J S, Sun R, et al., 2000. Characteristics of the bottom simulating reflectors near mud diapirs: off shore southwestern Taiwan [J]. Geo-Marine Letters, 20: 3 - 9.
- Chung S H, Lin A T, Lin C C, et al., 2016. Geological investigation of gas hydrate resource potential in the offshore areas of South-Southwest Taiwan[J]. Special Publication Central Geology Survey, 30: 1-42.
- Collett T S, 2002. Energy resource potential of natural gas hydrates[J]. AAPG Bulletin, 86(11): 1971-1992.
- Hinz K, Fritsch J, Kempter E H K, 1989. Thrust tectonics along the north-western continental margin of Sabah/ Borneo [J]. Geologische Rundschau, 78: 705 – 730.
- Huang Y S, Hsu S K, Su C C, et al., 2021. Shallow gas hydrates off southwest Taiwan and their mechanisms [J]. Marine Geophysical Research, 42: 7.
- Kvenvolden K A, 1988. Methane hydrate-a major reservoir of carbon in the shallow geosphere [J]? Chemical Geology, 71: 41-51.
- Konno Y, Fuji T, Sato A, et al., 2017. Key findings of the world's first offshore methane hydrate production test off the coast of Japan: toward future commercial production [J]. Energy & Fuels, 31: 2607 – 2616.
- Makogon Y F, Holditch S A, Makogon T Y, 2007. Natural gashydrates—A potential energy source for the 21st Century [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 56(1/3): 14-31.
- McConnell D R, Zhang Z J, Boswell R, 2012. Review of progress in evaluating gas hydrate drilling hazards [J]. Marine and Petroleum Geology, 34: 209 – 223.
- Milkov A V, 2004. Global estimates of hydrate-bound gas in marine sediments: how much is really out there? [J]. Earth-Science Reviews, 66(3/4): 183 – 197.
- Reed D L, Lundberg N, Liu C S, 1992. Structural relations along the margin of the offshore Taiwan accretionary: implications for accretion and crustal kinematics [J]. Acta Geologica Tanwanica, 30: 105 -122.

Sakai H, Gamo T, Kim E S, et al., 1999. Venting of carbon dioxide-rich

fluid and hydrate formation in mid-Okinawa Trough back arc basin [J]. Science, 248: 1093-1096.

- Sha Z B, Liang J Q, Zhang G X, et al., 2015. A seepage gas hydrate system in northern South China Sea; Seismic and well log interpretations [J]. Marine Geology, 366: 69-78.
- Trung N N, 2012. The gas hydrate potential in the South China Sea[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 88-89:41-47.
- Wang X, Pan L, Lau H C, et al., 2018. Reservoir volume of gas hydrate stability zones in permafrost regions of China [J]. Applied Energy,  $225 \cdot 486 - 500$ .
- Wei J G, Liang J Q, Lu J A, et al., 2019. Characteristics and dynamics of gas hydrate systems in the northwestern South China Sea-results of the fifth gas hydrate drilling expedition [J]. Marine and Petroleum Geology, 110: 287 - 298.
- Wu N Y, Yang S X, Zhang H Q, et al., 2010. Gas hydrate system of Shenhu Area, northern South China Sea; Wire-line logging and preliminary resources estimates [C]//Proceedings of 2010 Offshore Technology Conference, Houston, TX, USA, 3-6 May 2010; OTC 20485.
- Wu S, Zhang G, Huang Y, et al., 2005. Gas hydrate occurrence on the continental slope of the northern South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 22(3): 403 - 412.
- Yamamoto K, Dallimore S, 2008. Aurora-JOGMEC-NRCan Mallik 2006-2008 gas hydrate research project progress [J]. Fire in the Ice: Methane Hydrate Newsletter, 8(3): 1-5.
- Yamamoto K, Wang X, Tamaki M, et al., 2019. The second off shore production of methane hydrate in the Nankai Trough and gas production behavior from a heterogeneous methane hydrate reservoir [J]. Royal Society of Chemistry Advances, 9: 25987.
- Yang S X, Liang J Q, Lei Y, et al., 2017. GMGS4 Gas Hydrate Drilling Expedition in the South China Sea [J]. Fire in the Ice: Methane Hydrate Newsletter, 17(1): 7-11.
- Ye J L, Qin X W, Qiu H J, et al., 2018. Preliminary results of environmental monitoring of the natural gas hydrate production test in the South China Sea[J]. China Geology, 2: 202-209.
- Zhang G X, Yang S X, Zhang M, et al., 2014. GMGS2 expedition on investigates rich and complex gas hydrate environment in the South China Sea[J]. Fire in the Ice: Methane Hydrate Newsletter, 14 (1): 1-5.
- Zhang H Q, Yang S X, Wu N Y, et al., 2007. Successful and surprising results for China's first gas hydrate drilling expedition [J]. Fire in the Ice: Methane Hydrate Newsletter, 7(3): 6-9.
- 毕海波,马立杰,黄海军,等,2010.台西南盆地天然气水合物甲烷量 估算[J]. 海洋地质与第四纪地质,30(4):179-186
- 曾维平,周蒂,2003. GIS 辅助估算南海南部天然气水合物资源量 [J]. 热带海洋学报,22(6):35-45.
- 陈忠,颜文,黄奇瑜,等,2007.南沙海槽潜在天然气水合物的地质环 境及其指标特征[J]. 地学前缘,14(6):299-308.
- 陈多福,李绪宣,夏斌,2004.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,47(3):483-489.
- 陈多福,王茂春,夏斌,2005.青藏高原冻土带天然气水合物的形成条

件与分布预测[J]. 地球物理学报,48(1):165-172.

- 陈建文,2014.东海冲绳海槽天然气水合物成矿地质条件与资源潜力 [J]. 地球学报,35(6):726-732.
- 方银霞,黎明碧,金翔龙,2001.东海冲绳海槽天然气水合物的资源前 景[J]. 天然气地球科学,12(6):33-37.
- 葛倩,王家生,向华,等,2006.南海天然气水合物稳定带厚度及资源 量估算[J]. 地球科学一中国地质大学学报,31(2):245-249.
- 黄永样,Suess E,吴能友,2008. 南海北部陆坡甲烷和天然气水合物 地质:中德合作 SO-177 航次成果专报 [M]. 北京:地质出版社,1 - 197
- 库新勃,吴青柏,蒋观利,2007. 青藏高原多年冻土区天然气水合物可 能分布范围研究[J]. 天然气地球科学,18(4):588-592.
- 李建忠,郑民,张国生,等,2012.中国常规与非常规天然气资源潜力 及发展前景[J]. 石油学报,33(S1):89-98.
- 李永红,王伟超,卢振权,等,2015.青海木里三露天地区天然气水合 物资源量初步评价[J]. 现代地质,29(5):1251-1258.
- 梁金强,吴能友,杨木壮,等,2006.天然气水合物资源量估算方法及 应用[J]. 地质通报,25(9):1205-1210.
- 梁金强,张光学,陆敬安,等,2016. 南海东北部陆坡天然气水合物富 集特征及成因模式[J]. 天然气工业,36(10):157-162.
- 刘杰,杨睿,邬黛黛,等,2019.基于生烃思路的微生物成因水合物资 源量估算一以琼东南盆地西南深水区为例[J]. 天然气地球科 学,30(4),539-548.
- 刘晖,祝有海,庞守吉,等,2019.青海乌丽地区发现天然气水合物赋 存的重要证据[J]. 中国地质,46(5):1243-1244.
- 卢振权,吴必豪,金春爽,2007.天然气水合物资源量的一种估算方法 [J]. 石油实验地质,29(3):319-323.
- 卢振权,祝有海,张永勤,等,2010.青海祁连山冻土区天然气水合物 资源量的估算方法一以钻探区为例[J]. 地质通报,29(9):1310 -1318
- 沙志彬,梁金强,苏丕波,等,2015.珠江口盆地东部海域天然气水合 物钻探结果及其成藏要素研究[J]. 地学前缘, 22(6):125 -135
- 史斗,郑军卫,1999.世界天然气水合物研究开发现状和前景[J].地 球科学进展,14(4):330-339.
- 苏丕波, 雷怀彦, 梁金强, 等, 2010. 南海北部天然气水合物成矿区的 地球物理异常特征[J]. 新疆石油地质,31(5):485-488.
- 苏丕波,梁金强,付少英,等,2017. 南海北部天然气水合物成藏地质 条件及成因模式探讨[J]. 中国地质,44(3):415-427.
- 唐勇,方银霞,高金耀,等,2005.冲绳海槽天然气水合物稳定带特征 及资源量评价[J]. 海洋地质与第四纪地质,25(4):79-84.
- 王淑红,宋海斌,颜文,等,2005.南海南部天然气水合物稳定带厚度 及资源量估算[J]. 天然气工业,25(8):24-27.
- 王秀娟,吴时国,刘学伟,等,2010.基于测井和地震资料的神狐海域 天然气水合物资源量估算[J]. 地球物理学进展,25(4):1288 -1297.
- 吴青柏,蒋观利,张鹏,等,2015.青藏高原昆仑山垭口盆地发现天然 气水合物赋存的证据[J]. 科学通报,60:68-74.
- 徐宁,吴时国,王秀娟,等,2006.东海冲绳海槽陆坡天然气水合物的 地震学研究[J]. 地球物理学进展,21(2):564-571.

徐水师,王佟,刘天绩,等,2009.青海省木里煤田天然气水合物资源

量估算[J]. 中国煤炭地质,21(9):1-6.

- 徐学祖,程国栋,俞祁浩,1999. 青藏高原多年冻土区天然气水合物的 研究前景和建议[J]. 地球科学进展,14(2):201-204.
- 杨胜雄,梁金强,陆敬安,等,2017. 南海北部神狐海域天然气水合物 成藏特征及主控因素新认识[J]. 地学前缘,24(4):1-4.
- 杨文达,曾久岭,王振宇,2004.东海陆坡天然气水合物成矿远景 [J].海洋石油,24(2):1-8.
- 姚伯初,1998. 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,18(4):12-19.
- 姚伯初,2001. 南海的天然气水合物矿藏[J]. 热带海洋学报,20(2): 20-28.
- 叶建良,秦绪文,谢文卫,等,2020.中国南海天然气水合物第二次试 采主要进展[J].中国地质,47(3):557-568.
- 于兴河,付超,华柑霖,等,2019.未来接替能源一天然气水合物面临 的挑战与前景[J].古地理学报,21(1),107-126.
- 张光学,陈芳,沙志彬,等.南海东北部天然气水合物成藏演化地质 过程[J].地学前缘,2017,24(4):15-23.
- 张洪涛,张海启,祝有海,2007.中国天然气水合物调查研究现状及其

进展[J]. 中国地质,34(6):953-961.

- 张洪涛,祝有海,2011.中国冻土区天然气水合物调查研究[J].地质 通报,30(12):1809-1815.
- 张树林,2007.珠江口盆地白云凹陷天然气水合物成藏条件及资源量 前景[J].中国石油勘探,6:23-27.
- 周守为,陈伟,李清平,等,2017. 深水浅层非成岩天然气水合物固态 流化试采技术研究及进展[J]. 中国海上油气,29(4):1-8.
- 周守为,李清平,吕鑫,等,2019.天然气水合物开发研究方向的思考 与建议[J].中国海上油气,31(4):1-8.
- 周幼吾,郭东信,邱国庆,等,2000.中国冻土[M].北京:科学出版 社,1-450.
- 祝有海,张永勤,方慧,等,2020.中国陆域天然气水合物调查研究主要进展[J].中国地质调查,7(4):1-9.
- 祝有海,张永勤,文怀军,等,2009.青海祁连山冻土区发现天然气水 合物[J].地质学报,83(11):1762-1771.
- 祝有海,赵省民,卢振权,2011.中国冻土区天然气水合物找矿选区及资源潜力[J].天然气工业,31(1):13-19.

# A review of the resource potentials and test productions of natural gas hydrates in China

ZHU Youhai<sup>1</sup>, PANG Shouji<sup>1</sup>, WANG Pingkang<sup>1,2</sup>, ZHANG Shuai<sup>1</sup>, XIAO Rui<sup>1</sup>

(1. Oil and Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China; 2. China Geological Survey, Beijing 100037, China)

Abstract: China has been attaching great importance to research on natural gas hydrate resources. Since the mid-1990s, China has experienced three development stages of resource prediction, investigation, and test production of natural gas hydrate resources. Till now, five hydrate samples have been discovered in Shenhu, Dongsha, Qiongdongnan, offshore Taiwan of the South China Sea and in the Muli area of Qilian Mountain, with seven hydrate occurrences inferred including geology, geophysics and geochemistry in the South China Sea, the Okinawa Trough of the East China Sea, and the Tibetan Plateau. According to the hydrate stability zone, the natural gas hydrate resources in the South China Sea are estimated to be  $64 \times 10^{12}$  m<sup>3</sup>, those in the Okinawa Trough are about  $24 \times 10^{12}$  m<sup>3</sup>, and those in the terrestrial permafrost are about  $38 \times 10^{12}$  m<sup>3</sup>. The total amount of the natural gas hydrates in China reaches up to  $126 \times 10^{12}$  m<sup>3</sup>, which is twice the amount of China's conventional natural gas resources. Since 2011, China has carried out five test productions of hydrates in the Muli area of Qilian Mountain and in Shenhu area of the South China Sea using depressurization and heating methods, with gas production of  $117 \times 10^4$  m<sup>3</sup>. It is probable to exploit hydrates in large-scale fine-grained reservoirs located at the base of the classification ' pyramid'

Key words: natural gas hydrate; resource amount; test production; China