

极地天然气水合物资源利用前景

黄霞,王平康,庞守吉,肖睿,张帅,祝有海

(中国地质调查局油气资源调查中心,北京 100029)

摘要:极地天然气水合物资源潜力巨大,储层类型主要为富砂沉积物储层,最可能实现远景勘探和商业利用,是一种重要的战略能源。综述了天然气水合物在极地的分布情况、极地主要地区天然气水合物矿藏资源量以及水合物开发利用的资源金字塔。结合美国、加拿大和俄罗斯在北极冻土区天然气水合物勘探开发的案例进行了 4 种开采技术优缺点对比,并对极地区和非极地区 5 次天然气水合物试采效能进行对比评价。根据目前国际油气价格、能源结构、各国水合物研究目标和我国天然气水合物勘查开发现状等,提出了我国参与极地天然气水合物研究和开发的思路。

关键词:天然气水合物;战略能源;勘探开发;极地

中图分类号:P618.13

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2017.11003

天然气水合物具有巨大的储气能力,单位体积的天然气水合物在常温常压下,可以释放出 150~180 单位体积的天然气^[1]。它是一种规模巨大的新型潜在能源,其资源总量相当于 $2.1 \times 10^{16} \text{ m}^3$ 的天然气,是全球煤炭、石油和天然气等化石能源资源量总和的 2 倍^[2-4]。天然气水合物主要分布在 2 类地区:①水深 300~3 000 m 的海底,在海底以下 0~1 500 m 的沉积物中产出,如环太平洋周边、大西洋两岸、印度洋北部、南极近海及北冰洋周边,地中海、黑海、里海等内陆海以及贝加尔湖等湖底也有零星分布;②陆上冻土区,如环北冰洋的高纬度冻土区和我国青藏高原冻土区,尤其是南北两极冻土区。

据不完全统计,目前全球已发现的天然气水合物产地或其异常点有 157 处(Makogon 等的统计为 234 处),其中,陆地冻土区 10 处,海底水合物 147 处,北极和南极地区分别发现 19 和 5 处。

目前采获水合物实物样品的地区有 44 处,其余均是依据地质、地球物理和地球化学等资料推断的(图 1)。

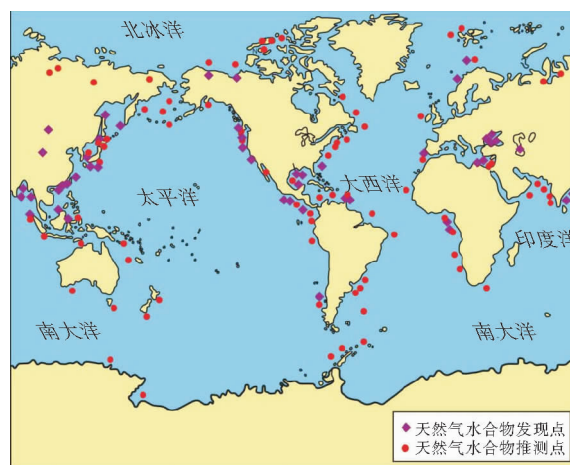


图 1 全球天然气水合物产地分布(据文献[5]修改)

Fig. 1 Global gas hydrate distribution map

(modified from reference[5])

收稿日期:2017-08-01

基金项目:国家自然科学基金(41202099)

作者简介:黄霞(1982—),女,博士,副研究员,主要从事油气地质地球化学勘查研究工作。E-mail:huangxia@live.com

1 极地天然气水合物分布

极地多年冻土区天然气水合物研究有近 50

年的历史。极地大陆及其毗邻海域的沉积物(岩)中存在大面积的永久冻土层,具有天然气水合物形成的温度和压力条件^[1],从已有估算结果来看,资源潜力巨大(表 1)。俄罗斯西伯利亚盆地的麦索雅哈气田、加拿大马更些三角洲和美国阿拉斯加北坡是目前极地冻土区天然气水合物勘探开发和国际关注程度较高的三大地区。

表 1 极地主要地区天然气水合物矿藏资源量评估

Table 1 Gas hydrate resource estimate in the polar region

地理位置	资源量(CH ₄)/m ³	来源
阿拉斯加北坡	$(0.71 \sim 4.47) \times 10^{12}$	文献[1]
北极群岛	$(19 \sim 620) \times 10^{12}$	文献[58]
麦索亚哈	0.062×10^{12}	文献[58]
普拉德霍湾 Eileen 地区	$(1.0 \sim 1.2) \times 10^{12}$	文献[59]
马更些-波弗特海	$(1.0 \sim 10) \times 10^{12}$	文献[12, 54]
南极近海	$(0.97 \sim 1.63) \times 10^{13}$	文献[55]
南设得兰陆缘	2.6×10^{12}	文献[25]
南极半岛陆缘	$(1.6 \sim 2.8) \times 10^{10}$	文献[56]
罗斯海	3.6×10^{11}	文献[57]

1.1 北极地区

北极地区范围很广,66°34'N 以北的北极圈面积达 $2\,100 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。北极地区经历多期构造运动,形成复杂的地质构造特征,油气资源极为丰富^[6],盆地经历多期改造。通常认为,在北极地区,有利于天然气水合物形成的热条件从上新世(约 1.88 Ma)就已经具备,并持续至今^[7, 8]。

根据钻探取样、钻孔测井和地球物理调查研究,北极陆上天然气水合物主要聚集于俄罗斯、美国阿拉斯加和加拿大的永久冻土区^[1, 5, 8-12],除此之外,在挪威斯瓦尔巴群岛和挪威岛也有可能存在天然气水合物^[13]。根据 Grantz 等^[14]和 Kvenvolden 等^[15]的认识,北极海洋天然气水合物广泛聚集在阿拉斯加波弗特海北部陆架外缘、陆坡和陆隆上部的海底之下,推测挪威西北巴伦支海的熊岛盆地和斯匹兹卑尔根地区海底也存在天然气水合物^[16-19]。东西伯利亚海、拉普帖夫海、喀拉海、巴伦支海和楚克奇海等北冰洋边海均为天然气水合物存在的有利地区^[20]。

1.2 南极地区

南极洲面积约为 $1\,400 \times 10^4 \text{ km}^2$,四周被南大洋所环绕,98%以上的地区终年被冰雪覆盖,不足 2%的地区夏季裸露。南极洲主要分为东南极地盾与西南极中生代褶皱带两大构造单元,其间的横贯南极山脉具有过渡带性质,由基底与盖层构成。基底为由元古宙及寒武系—奥陶系组成的双构造层基底;盖层则由泥盆系—二叠系组成。横贯南极山脉西侧分布着威德尔盆地、罗斯盆地及柏德冰下盆地 3 个大的盆地^[21]。南极地区天然气水合物调查和研究始于 20 世纪 70 年代,依据海洋地质、地球物理 BSR 和地球化学调查资料推测,天然气水合物可能主要存在于南设得兰陆缘^[22-26]、南极半岛的太平洋陆缘^[27-29]、罗斯海陆缘^[30-33]、威尔克斯地陆缘^[34-36]、普里兹湾陆缘^[37, 38]、里瑟—拉森海陆缘^[39, 40]和南奥克尼群岛东南陆缘^[41, 42]。

2 极地天然气水合物资源潜力

自 1977 年以来,多个学者对全球海洋和陆地天然气水合物资源量进行了评估^[3, 43-50],海洋天然气水合物的天然气资源量为 $(3 \sim 7.6) \times 10^{15} \text{ m}^3$,陆域天然气水合物的天然气资源量为 $1.4 \times 10^{13} \sim 3.4 \times 10^{16} \text{ m}^3$ (图 2)。由于南北极大陆和与极地大陆相毗邻的海洋均具备天然气水合物形成

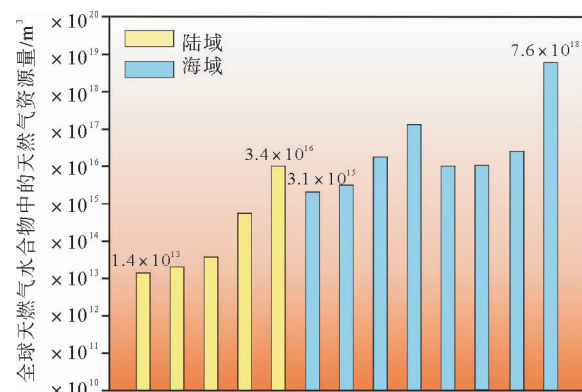


图 2 全球天然气水合物中的天然气资源量评价
(据文献[3, 43-50])

Fig. 2 The global assessment of gas resource quantity in gas hydrate (from references [3, 43-50])

的温压条件,因而极地天然气水合物资源既包含全球主要陆域天然气水合物,也包括邻近极地大陆的海洋天然气水合物,资源潜力巨大。

2.1 北极地区天然气水合物资源潜力

针对北极地区天然气水合物资源潜力,俄罗斯、美国和加拿大等均针对本国管辖区做了评估(表 1)。俄罗斯评估结果显示,北冰洋天然气水合物主要存在于洋底、大陆斜坡和大陆架,总的天然气资源量为 $3.18 \times 10^{15} \text{ m}^3$,其中洋底为 $2.4 \times 10^{15} \text{ m}^3$,大陆斜坡区为 $5.3 \times 10^{14} \text{ m}^3$,俄罗斯陆架区为 $2.46 \times 10^{14} \text{ m}^3$ 。进一步估算显示,东西伯利亚与拉普帖夫海最高达 $8 \times 10^{12} \text{ m}^3$,楚克奇海斜坡最高约 $1.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$,白令海最高达 $12 \times 10^{12} \text{ m}^3$,库页岛—堪察加海沟最高约为 $4 \times 10^{12} \text{ m}^3$,这 4 个海域的天然气水合物约占俄罗斯管辖海域天然气水合物资源量的 50%^[51,52]。除此之外,俄罗斯管辖的北极陆域地区,如西西伯利亚盆地、Lena-Tunguska 地区、Timan-Pechora 盆地、东北西伯利亚和堪察加半岛地区的天然气水合物资源潜力也相当巨大。

美国对其周边海域和北美极地冻土区天然气水合物资源评价结果显示^[53],位于北极区的阿拉斯加海域和陆域甲烷水合物的天然气资源量分别占全美甲烷水合物资源量的 52.8% 和 0.2%,分别为 4.78×10^{15} 和 $1.81 \times 10^{13} \text{ m}^3$ 。在阿拉斯加海域,波弗特海、白令海、阿留申海沟、阿拉斯加海湾的甲烷天然气水合物的天然气资源量分别为 9.14×10^{14} , 2.074×10^{15} , 6.08×10^{14} 和 $1.17 \times 10^{15} \text{ m}^3$ 。在阿拉斯加陆域,三角洲的顶积层和造山带的甲烷天然气水合物的天然气资源量分别为 4×10^{12} 和 $1.3 \times 10^{13} \text{ m}^3$ 。

加拿大陆架和其北极冻土区(马更些—波弗特海三角洲、北极群岛、戴维斯海峡、拉布拉多陆架、Scotian 陆架、纽芬兰的 Grand Banks 以及加拿大—大西洋边缘、加拿大—太平洋边缘)天然气水合物的天然气资源量保守估算为 $(43.6 \sim 809) \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[54],其中位于北极地区的马更些—波弗特海三角洲海、陆域为 $(2.4 \sim 87) \times 10^{12} \text{ m}^3$,北极群岛海、陆域为 $(19 \sim 620) \times 10^{12} \text{ m}^3$,极区天然气水合物资源量占全加拿大总资源量的 49%~87%。

2.2 南极地区天然气水合物资源潜力

针对南极地区天然气水合物资源潜力,不同学者也给出了不同的估算值(表 1)。王力峰等^[55]依据南极陆缘热流分布估算南极近海天然气水合物的天然气资源量为 $(0.97 \sim 1.63) \times 10^{13} \text{ m}^3$ 。Lodolo 等^[25]基于多道地震反射数据估算南设得兰陆缘天然气水合物的天然气资源量为 $2.6 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。Loreto^[56]基于地球物理数据分析,认为南极半岛陆缘天然气水合物的天然气资源量为 $(1.6 \sim 2.8) \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。王威等^[57]通过分析罗斯海天然气水合物成藏条件,估算该区的天然气水合物的天然气资源量为 $3.6 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。

依据 Walsh 等^[60]绘制的全球主要地区的天然气水合物资源量分布图(图 3)来看,在极地海域,北冰洋地区天然气水合物的天然气资源量为 $1.87 \times 10^{14} \text{ m}^3$,南大洋为 $1.01 \times 10^{14} \text{ m}^3$;在极地陆域地区,美国、俄罗斯和加拿大的天然气水合物资源量相当巨大。

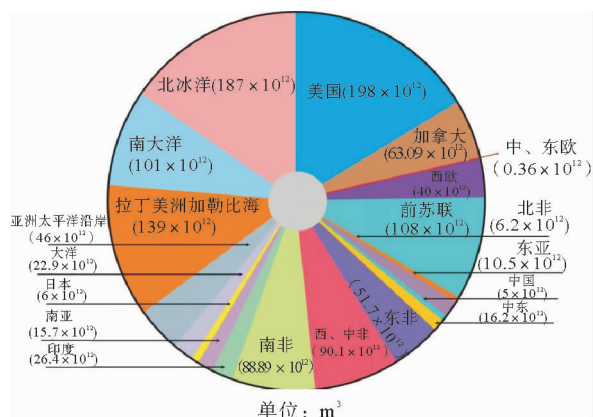


图 3 全球主要地区天然气水合物的天然气资源量分布(据文献[60])

Fig. 3 Gas resources distribution of gas hydrate in world's major regions (from reference [60])

2.3 资源金字塔

虽然不同国家、不同学者对于极地区的天然气水合物资源潜力评估存在差异,但从估算资源量的数量级来看,南北极海、陆域的天然气水合物资源量相当丰富,在全球天然气水合物资源量中的占比很大。极地如此规模巨大的天然气水合物

资源量,对未来极地国家的能源政策和其国内的能源供需关系将会产生重要影响。以美国阿拉斯加北坡为例,最新评估结果显示阿拉斯加北坡未探明的技术可采天然气水合物资源量为 $(0.71 \sim 4.47) \times 10^{12} \text{ m}^3$,平均估算为 $2.42 \times 10^{12} \text{ m}^3$ [1]。据美国能源部能源信息署资料,按照当前美国的能源消费速率,阿拉斯加北坡的水合物中的天然气资源可满足1亿普通美国家庭10年对天然气供热的能源需求。同时,极地天然气水合物资源量预测范围相差较大,也表明极地海、陆域天然气水合物资源勘查和研究程度相对较低,目前,大多数地区仅限于一个估算值。

在评估极地冻土区天然气水合物资源量的同时,天然气水合物的开发和利用也成为近年来极地天然气水合物研究的热点,亦是环北冰洋国家关注的焦点。Boswell等[61,62]提出了由4种不同的天然气水合物带组成的资源金字塔模型(图4)。在资源金字塔中,最有希望开发和利用的资源位于塔顶,而最难以开发利用的部分位于塔底。从上到下,依次为:①富砂储层;②富黏土的裂缝型储层;③大量的位于海底的天然气水合物地层;④弥散沉积于非渗透性黏土中的低浓度部分。上面的2个部分,由于能提供天然气水合物高浓度聚集所需的储集渗透性,最可能实现远景勘探和商业利用[62]。这2个部分常共生出现,储集体包

括水平状到近水平状、粗粒、渗透性沉积层(主要是砂质的)和垂直到近垂直的裂缝[63]。

3 极地天然气水合物勘探开发

3.1 北极地区天然气水合物勘探开发现状

自1970—1972年在极地多年冻土区获取天然气水合物实物样品以来,科学家就开始对多年冻土区天然气水合物的地质成因、地球物理和地球化学勘探方法、资源评估对气候变化和环境的影响以及天然气水合物开采等进行了研究[64]。俄罗斯西伯利亚盆地的麦索雅哈气田、加拿大马更些三角洲和美国阿拉斯加北坡是目前极地冻土区天然气水合物勘探开发和国际关注程度较高的三大地区。这三大地区的天然气水合物勘探开发研究经历了从发现—地质研究—勘探—开采试验的过程,目前该地区的天然气水合物成藏理论渐趋完善、勘查技术渐趋成熟和试采装备渐趋完备。

3.2 开采技术及效能评价

开采天然气水合物就是回收其中的甲烷气体,使这一潜在资源作为常规天然气加以利用。由于天然气水合物埋藏在海底沉积物或冻土区的岩层中,传统的油气开发技术难以完全移植到天然气水合物的开发利用上。依据天然气水合物只有在低温高压条件下才能稳定存在的特征,用升高温度或降低压力和改变天然气水合物相平衡的方式来促使水合物分解并释放出天然气,目前国际上存在4种主要的开发技术,即加热法、降压法、注入抑制剂法和二氧化碳置换法(图5)。

对比现行的4种天然气水合物开采技术(表2),降压法和加热法在技术上易于实现,加热法成本较高,降压法则具有低成本和较高的产气效率。相比,二氧化碳置换法具有更高的技术含量和需要更大的经济投入,但由于其兼顾对环境的考虑,既能实现可燃冰中甲烷气体生产,又能实现碳埋藏,已成为目前国际上最为关切的一种开采方法。

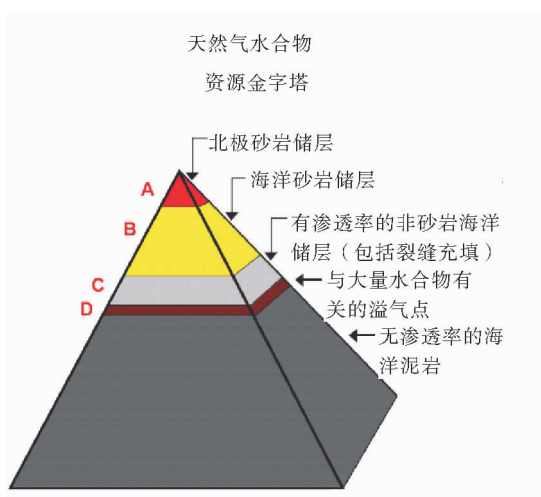


图4 天然气水合物资源金字塔(引自文献[61,62])

Fig. 4 Gas hydrate resource pyramid
(from references[61,62])

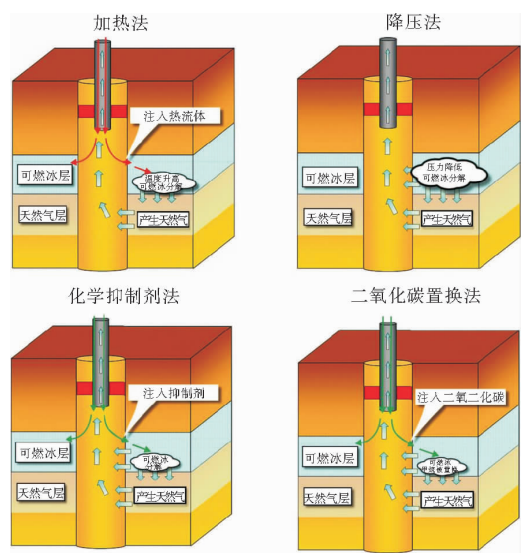


图 5 天然气水合物开采方法示意图

Fig. 5 Sketch map of gas hydrate extraction method

从极地区和非极地区 5 次天然气水合物试采效能来看(表 3),极地区的俄罗斯麦索雅哈气田的天然气平均日产量为 525 000 m³,加拿大 Mallik 地区为 100~2 245 m³,美国阿拉斯加地区为 2 143 m³;非极地区日本南海海槽为 20 000 m³,中国祁连山冻土区仅为 22 m³。可见,天然气水合物试采效能不仅与所采用的试采技术方法有关,而且还跟不同地区的天然气水合物储量特征相关。虽然从目前的试采效能来看,大多数地区的天然气水合物资源开发均达不到商业开发目标。但毋庸置疑的是,随着试采技术和工艺的不不断提升,商业性开发天然气水合物在经济上也是可行的,如果未来能源价格高涨,天然气水合物开发在经济上也是有利可图的。

表 2 四种水合物开采技术优缺点对比

Table 2 Comparison of four kinds of gas hydrate extraction technology

开采技术	优点	缺点	试验区
加热法	能有效控制水合物开采速度	1 会造成大量热损失,效率很低,且要求向下注热和向上采气同步进行,开采成本昂贵 2 注入技术也限制了该方法的使用	加拿大马更些三角洲 Mallik 地区
降压法	无热量消耗和损失,不需要连续激发,成本较低,方法简便易行、无需增加设备,适用于大面积开采,尤其适用于存在下伏游离气层的水合物藏的开采,是目前最常用的方法	1 不适用于储层原始温度接近或低于 0 ℃ 的水合物矿藏 2 单一使用减压法开采天然气速度很慢	前苏联麦索雅哈气田、加拿大 Mallik 气田和美国阿拉斯加气田
注入抑制剂法	人为控制水合物矿层的分解速度	1 化学试剂费用昂贵,开采速度缓慢,回采气体比较困难,还会带来一些环境污染问题 2 不适用于开采海洋天然气水合物矿藏	前苏联麦索雅哈气田
CO ₂ 置换开采法	能帮助减排工农业生产和日常生活中产生的 CO ₂ 温室气体	投资高,目前正处于试验开采测试阶段	美国阿拉斯加

表 3 极地区和非极地区天然气水合物试生产效能对比

Table 3 Comparison of gas hydrate pilot production efficiency in polar and non-polar regions

	试采地点	试采时间	试采方法	持续时间	平均日产量/m ³	累计气量/m ³
极地区	俄罗斯麦索亚哈	1969—2005 年	降压法、化学抑制剂法	36 a(半连续生产)	525 000	6.9×10 ⁹
		2002 年	加热法为主,降压法为辅	123.65 h	100	516
	加拿大 Mallik	2007 年	降压法为主,加热法为辅	12.5 h	1 596	830
		2008 年	降压法	139 h	2 245	13 000
非极地区	美国阿拉斯加	2012 年	CO ₂ 置换法	14 d	2 143	30 000
	中国祁连山	2011 年	降压法、加热法	101 h	22	95
	日本南海海槽	2013 年	降压法	6 d	20 000	120 000

4 极地天然气水合物开发思路

尽管很多人怀疑天然气水合物能否从“政府研究项目”发展成为现实能源,甚至可能对环境带来严重影响,但随着不断加快的天然气水合物开发利用研究步伐,一旦克服了生产技术上的瓶颈,降低了生产成本,排除了开发过程中的环境影响,在经济因素和政治因素的驱动下,这一规模巨大的潜在能源最终将被人类社会所利用,并成为现实能源,真正实现天然气水合物商业化开采可能仅是一个时间问题。但不可否认,天然气水合物作为未来能源的商业可行性主要取决于市场上的能源,特别是天然气中长期的供需关系和价格。根据 BP《世界能源统计年鉴 2017》,2016 年,全球天然气在一次能源消费中占 23.8%,全球天然气

探明储量过去 10 年增长了 30.8 万亿 m³,可以满足 52.5 年的全球生产需要。2016 年天然气价格较上年整体下跌,但受需求增速小幅回升影响,全年美国 HH、英国 NBP、东北亚 LNG 现货到岸平均价格为 2.5 美元/百万英热单位、4.6 美元/百万英热单位和 5.5 美元/百万英热单位,同比分别下跌 5.0%、30%和 29%。如果当前全球能源增速变缓,油气价格疲软的情况持续较长时间,水合物商业潜力将存在巨大不确定性和风险。

随着全球气候变暖,北冰洋海冰加速融化和航道开通,北极地区蕴藏的丰富资源都将从潜在利益变成现实利益,各国的权益纷争也将愈演愈烈。在极地资源开发的国际背景下,美国、加拿大、俄罗斯和挪威等极地国家以及非极地国家对天然气水合物作为一种潜在的战略性能源所持态度有所不同(表 4)

表 4 极地国家与非极地国家天然气水合物研究动机及焦点
Table 4 Research motive and focus of gas hydrate in polar countries and non polar countries

国家	极地国家				非极地国家					
	挪威	俄罗斯	加拿大	美国	中国	德国	印度	日本	韩国	英国
国家研究计划	有	无	无	有	有	有	有	有	有	无
研究动机										
能源供给安全		✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	
环境/气候变化	✓		✓	✓		✓			✓	
与其他项目合作		✓	✓	✓		✓	✓			
研究焦点										
能源评估	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓		✓
生产模型和试验			✓	✓	✓		✓	✓		✓
风险评估	✓	✓	✓	✓		✓				✓
气候变化影响	✓		✓	✓		✓			✓	✓
天然气储运	✓		✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓
二氧化碳封存	✓		✓	✓	✓			✓	✓	✓
参与机构										
政府部门	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
私人企业	✓	✓	✓	✓			✓	✓		
大学	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

2016 年,我国天然气探明储量为 5.4 万亿 m³,占全球总量的 2.9%,比 2015(2.1%)略有增加,储采比为 28.8 年。2016 年我国天然气消费

量 2 058 亿 m³,产量 1 368 亿 m³,供需缺口近 700 亿 m³,对外依存度 34%。根据 2015 年的统计局数据,我国人均天然气消费量约 140 m³,天

然气占一次能源消费总量的比重约为 5.9%, 远低于世界平均水平的 23.7%, 未来能源消费结构继续演变, 天然气将在一次能源消费中占比进一步提高, 天然气产量和消费量双升, 供需缺口扩大。据预测, 在 2030 年前后, 天然气水合物将可能实现产业化, 这将大幅提高天然气的供应。

我国非常重视天然气水合物的调查研究, 已取得重大进展。中国地质调查局相继在南海北部和祁连山冻土区成功钻获水合物样品, 证实我国存在这一规模巨大的潜在能源, 同时也在南海北部和祁连山冻土区成功实现了试采, 掌握水合物试采技术。基于我国天然气水合物勘查开发现状, 为防止未来在天然气水合物商业化开发中产生被动以及对于极地天然气水合物资源的战略性考虑, 中国一方面通过一系列的水合物试生产试验, 在开采技术上自主创新, 掌握水合物关键性开发技术, 成为极地国家未来水合物开采过程中不可或缺的合作伙伴, 积极介入极地水合物开发。另一方面应大力鼓励合作, 积极参与极地油气田开发以及开展环境气候效应研究。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Makogon Y F, Holditch S A, Makogon T Y. Natural gas-hydrates—A potential energy source for the 21st Century [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2007, 56: 14-31.
- [3] Kvenvolden K A. Methane hydrate—a major reservoir of carbon in the shallow geosphere[J]. *Chemical Geology*, 1988, 71: 41-51.
- [4] Sloan E D. *Clathrate Hydrates of Natural Gases* (second edit)[M]. New York: Marcel Dekker Inc., 1998: 1-628.
- [5] Collett T S, Johnson A H, Knapp C C, et al. Natural Gas Hydrates: A Review[C]// Collett T S, Johnson A H, Knapp C C, et al. *Natural Gas Hydrates—Energy Resource Potential and Associated Geologic Hazards*; AAPG Memoir 89, 2009: 146-219.
- [6] Drachev S S, Malyshev N A, Nikishin A M. Tectonic History and Petroleum Geology of the Russian Arcticshelves: An Overview[C]// Vinnig B A, Pickering S C. *Petroleum Geology: From Mature Basins to New Frontiers—Proceedings of the 7th Petroleum Geology Conference*. London: London Geological Society, 2010: 591-619. Doi:10.1144/0070591.
- [7] Collett T S, Dallimore S R. Permafrost-associated Gas Hydrate[M]// Max M D. *Natural Gas Hydrate in Oceanic and Permafrost Environments: The Netherlands*, Kluwer Academic Publishers, 2000: 43-60.
- [8] Collett T S. Energy resource potential of natural gas hydrates[C]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86:1971-1992.
- [9] Kvenvolden K A. A Primer on Gas Hydrates[M]// Howell D G. *The Future of Energy Gases—U. S. Geological Survey Professional Paper 1570*; Washington, United States Government Printing Office, 1993: 279-291.
- [10] Cherskiy N V, Tsarev V P, Nikitin S P. Investigation and prediction of conditions of accumulation of gas resources in gas-hydrate pools[J]. *Petroleum Geology*, 1985, 21: 65-89.
- [11] Judge A, Smith S L, Majorwicz J. The current distribution and thermal stability of natural gas hydrates in the Canadian Polar Regions[C]// *Proceedings of the Fourth International Offshore and Polar Engineering Conference*. Osaka, Japan, 1994: 307-313.
- [12] Osadetz K, Chen Z H. A re-examination of Beaufort Sea-Mackenzie Delta Basin gas hydrate resource potential using a petroleum system approach[C]// *Proceedings of the Fifth International Conference on Gas Hydrate*. Trondheim, Norway, 2005: 11.
- [13] Landvik J Y, Mangerud J, Salvigsen O. Glacial history and permafrost in the Svalbard Area[C]// *Proceedings of the Fifth International Conference on Permafrost*. Trondheim, Norway, 1988: 194-198.
- [14] Grantz A, Dinter D A. Constraints of geologic processes on western Beaufort Sea oil developments[J]. *Oil and Gas Journal*, 1980, 78: 304-319.
- [15] Kvenvolden K A, Grantz A. Gas hydrates of the Arctic Ocean region[M]// *The Geology of North America: The Arctic Ocean Region*. Geological Society of America, 1990: 539-549.
- [16] Laberg J S, Andreassen K. Gas hydrate and free gas indications within the Cenozoic succession of the Bjørnøya Basin, western Barents Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1996, 13(8): 921-940.
- [17] Laberg J S, Andreassen K, Knutsen S M. Inferred gas hydrate on the Barents Sea Shelf—a model for its formation and a volume estimate[J]. *Geo-Marine Letters*, 1998, 18 (1): 26-33.
- [18] Mienert J, Posewang J, Baumann M. Gas hydrates along the northeastern Atlantic margin: possible hydrate-bound margin instabilities and possible release of methane[R]// Henriot J P, Mienert J. *Gas hydrates: Relevance to world margin stability and climate change*. Geological Society. London: Special Publication, 1998, 137(1): 275-291.

- [19] Bugge T, Befring S, Belderson R H, et al. A giant three-stage submarine slide off Norway[J]. *Geo-Marine Letters*, 1987, 7(4): 191-198.
- [20] Соловьев В А. Газогидратоносность недр Мирового Океана [J]. *Газовая промышленность*, 2001, 12: 28-35.
- [21] 高子英. 南极洲地质矿产概况[J]. *云南地质*, 2000, 19(3): 308-315.
- [22] Lodolo E, Camerlenghi A, Brancolini G. A bottom simulating reflector on the South Shetland margin, Antarctic Peninsula[J]. *Antarctic Science*, 1993, 5(2): 207-210.
- [23] Tinivella U, Lodolo E, Camerlenghi A, et al. Seismic tomography study of a bottom simulating reflector off the South Shetland Islands (Antarctica)[R]//Henriet J P, Mienert J. Gas hydrate: relevance to world margin stability and climate change. Geological Society, London, Special Publications, 1998, 137(1): 141-151.
- [24] Lodolo E, Tinivella U, Pellis, et al. Seismic investigation of Bottom Simulating Reflectors on the South Shetland margin[J]. *Terra Antarctica Report*, 1998, 2: 71-74.
- [25] Lodolo E, Camerlenghi A, Madrussanic G, et al. Assessment of gas hydrate and free gas distribution on the South Shetland margin (Antarctica) based on multichannel seismic reflection data[J]. *Geophysical Journal International*, 2002, 148(1): 103-119.
- [26] Tinivella U, Accaino F, Vedova B D. Gas hydrates and active mud volcanism on the South Shetland continental margin, Antarctic Peninsula [J]. *Geo-Marine Letters*, 2008, 28(2): 97-106.
- [27] Rebesco M, Larter R D, Barker P F, et al. The history of sedimentation on the continental rise west of the Antarctic Peninsula[R]//Barker P F, Cooper A K. *Geology and Seismic Stratigraphy of the Antarctic Margin: Part 2 AGU, Antarctic Research Series*, 1997, 71: 29-49.
- [28] Shipboard Scientific Party. Site 1096[R]//Barker P F, Camerlenghi A, Acton G D, et al. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports*. College Station, TX (Ocean Drilling Program), 1999: 178.
- [29] Shipboard Scientific Party. Palmer Deep (Sites 1098 and 1099)[R]//Barker P F, Camerlenghi A, Acton G D, et al. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports*. College Station, TX (Ocean Drilling Program), 1999: 178.
- [30] McIver R D. Hydrocarbon gases in canned core samples from Leg 28 Sites 271, 272, and 273, Ross Sea[R]//Hayes D E, Frakes L A. *Deep Sea Drilling Project, Initial Reports*, Washington (U. S. Government Printing Office), 1975, 28: 815-817.
- [31] Shipboard Scientific Party. Sites 270, 271, 272 [R]//Hayes D E, Frakes L A, et al. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*. Washington (U. S. Government Printing Office), 1975, 28: 211-334.
- [32] Mann R, Gieskes J M. Interstitial water studies, Leg 28 [R]//Hayes D E, Frakes L A, et al. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*. Washington (U. S. Government Printing Office), 1975, 28: 805-814.
- [33] Geletti R, Praeg D, Busetti M. Evidence of gas hydrates and mud volcanoes in the western Ross Sea, Antarctica [Z]//33rd International Geological Congress, 2008.
- [34] Kvenvolden K A, Golan-Bac M, Rapp J B. Hydrocarbon geochemistry of sediments offshore from Antarctica: Wilkes Land continental margin [C]//Eittreim S L, Hampton M A. *The Antarctic continental margin: Geology and Geophysics of Offshore Wilkes Land*. Circum-Pacific Council for Energy and Mineral Resources, Earth Series. Houston, Texas, 1987: 5A: 205-213.
- [35] Ishihara T, Tanahashi M, Sato M, et al. Preliminary report of geophysical and geological surveys of the west Wilkes Land margin[C]//*Proceedings of the NIPR Symposium on Antarctic Geosciences*. 1996, 9: 91-108.
- [36] Close D I, Stagg H M J, O'Brien P E. Seismic stratigraphy and sediment distribution on the Wilkes Land and Terre Adélie margins, East Antarctica[J]. *Marine Geology*, 2007, 239(1/2): 33-57.
- [37] Shipboard Scientific Party. Sites 1165 // O'Brien P E, Cooper A K, Richter C, et al. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports*. College Station TX (Ocean Drilling Program), 2001, 188: 1-191.
- [38] Claypool G E, Lorenson T D, Johnson C A. Authigenic carbonates, methane generation, and oxidation in continental rise and shelf sediments, ODP Leg 188 Sites 1165 and 1166, offshore Antarctic (Prydz Bay)[C]//Cooper A K, O'Brien P E, Richter C. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*. College Station TX (Ocean Drilling Program), 2004, 188: 1-15.
- [39] Kuvaas B, Kristoffersen Y, Leitchenkov G, et al. Seismic expression of glaciomarine deposits in the eastern Riiser Larsen Sea, Antarctica[J]. *Marine Geology*, 2004, 207(1-4): 1-15.
- [40] Solli K, Kuvaas B, Kristoffersen Y, et al. A seismo-stratigraphic analysis of glaciomarine deposits in the eastern Riiser-Larsen Sea (Antarctica)[J]. *Marine Geophysical Researches*, 2007, 28(1): 43-57.
- [41] Shipboard Scientific Party, Site 695 [R]//Barker P E, Kennett J P, et al. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports*. College Station, TX (Ocean Drilling Program). 1988, 113: 527-606.
- [42] Lonsdale M J. The relationship between silica diagenesis, methane, and seismic reflections on the South Orkney micro-continent[R]//Barker P E, Kennett J P, et al. *Proceeding of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*.

- College Station, TX (Ocean Drilling Program), 1990, 113: 27-37.
- [43] Meyer R F. Speculations on oil and gas resources in small fields and unconventional deposits[M]// Boston, Pitman. Long-term Energy Resources, 1981: 49-72.
- [44] McIver R D. Gas hydrate[M]// Boston, Pitman. Long-term energy resources, 1981: 713-726.
- [45] Trofimuk A A, Cherskiy N V, Tsarev V P. The role of continental glaciation and hydrate formation on petroleum occurrences[C]//Future supply of nature-made petroleum and gas: New York, Pergamon Press, 197: 919-926.
- [46] MacDonald G T. The future of methane as an energy resource[J]. Annual Review of Energy, 1990, 15: 53-83.
- [47] Dobrynin V M, Yu P. Korotajev, Plyushev D V. Gas hydrate-A possible energy resource[M]//Long-term energy resources; Boston, Pitman Publishers, 1981: 727-729.
- [48] Milkov A V, Claypool G E, Lee Y J, et al. In situ methane concentrations at Hydrate Ridge, offshore Oregon: New constraints on the global gas hydrate inventory from active margins[J]. Geology, 2003, 31(10): 833-836.
- [49] Klauda J B, Sandler S I. Global distribution of methane hydrate in ocean sediment[J]. Energy and Fuels, 2005, 19: 459-470.
- [50] Kvenvolden K A, Claypool G E. Gas hydrates in oceanic sediments[M]. U. S. Geological Survey Open-File Report, 88-216, 1988: 50.
- [51] Матвеева Т В, Черкашев Г А. Газогидраты Проблемы: изучения и освоения, Вниокеангеология [Z]. <http://www.rosnedra.gov.ru/data/Files/File/2569.pdf>
- [52] 赵 荣. 俄罗斯天然气水合物研究进展概述[J]. 青海师范大学学报:自然科学版, 2014(2): 43-48.
- [53] U. S. DOE. A strategy for Methane Hydrates Research & Developments[R]. U. S. Department of Energy, 1998: 34.
- [54] Majorowicz J A, Osadetz K G. Gas hydrate distribution and volume in Canada[C]. AAPG Bull, 2001, 85(7): 1211-1230.
- [55] 王力峰, 邓希光, 沙志彬, 等. 南极陆缘热流分布与天然气水合物资源量研究[J]. 极地研究, 2013, 25(3): 241-248.
- [56] Loreto M F, Tinivella U, Accaino F, et al. Offshore Antarctic Peninsula gas hydrate reservoir characterization by geophysical data analysis[J]. Energies, 2011, 4(1): 39-56.
- [57] 王 威, 高金耀, 沈中延, 等. 罗斯海天然气水合物成藏条件及资源量评估[J]. 海洋学研究, 2015, 33(1): 16-24.
- [58] 刘玉山, 吴必豪. 大陆天然气水合物的资源开发与环境影响研究[J]. 矿床地质, 2011, 30(4): 711-724.
- [59] Collett T S. Natural gas hydrates of the Prudhoe Bay and Kuparuk River area, North Slope, Alaska[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1993, 77(5): 793-812.
- [60] Walsh T P, Stokes P J, Singh P K. Characterization and quantification of the methane hydrate resource potential associated with the Barrow Gas Fields[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrates (ICGH), Vancouver, British Columbia, Canada, 2008.
- [61] Boswell, Collett T S. The Gas Hydrates Resource Pyramid [J]. U. S. DOE-NETL Fire in the Ice Newsletter, 2006, 6(3): 5-7.
- [62] Boswell R, Kleinberg R, Collett T S, et al. Exploration priorities for marine gas hydrate resources [J]. U. S. DOE-NETL Fire in the Ice Newsletter, 2007, 7(2): 11-13.
- [63] Collett T, Agena W, Lee M, et al. Assessment of gas hydrate resources on the North Slope, Alaska[R]. U. S. Geological Survey Fact Sheet, 2008:2008-3073.
- [64] 陈志豪, 吴能友. 国际多年冻土区天然气水合物勘探开发现状与启示[J]. 海洋地质动态, 2010, 26(11): 36-44.

FUTURE UTILIZATION OF GAS HYDRATE RESOURCES IN POLAR REGIONS

HUANG Xia, WANG Pingkang, PANG Shouji, XIAO Rui, ZHANG Shuai, ZHU Youhai

(Oil & Gas Survey Centre, China Geological Survey, Beijing 100029, China)

Abstract: A great amount of gas hydrates occurs in polar regions. They are dominated by the type of sand rich reservoir which is relatively easier to be put into exploration and commercial production. Therefore, gas hydrates in the polar region are regarded as a kind of important strategic energy sources of the world. In this paper, upon the distribution of gas hydrate, we made an assessment of gas hydrate resource, and reviewed the gas hydrate resource pyramid in the polar regions. Upon the information from the US, Canada and Russia on exploration and development of gas hydrate in the Arctic region, we made an introduction to and comparison of four kinds of extraction technology, and gas hydrate pilot production efficiency in polar and non-polar regions. According to the current international oil and gas prices, the energy structure of the world, research targets of gas hydrate in various countries and the current situation of gas hydrate exploration and development in China, we suggest China actively participating in the research and development of polar gas hydrate.

Key words: gas hydrate; strategic energy; exploration and development; polar region

关于作者著作权及稿酬的声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。该社著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意上述声明。

《海洋地质前沿》编辑部