

中国冻土区天然气水合物调查研究

张洪涛¹, 祝有海²

ZHANG Hong-tao¹, ZHU You-hai²

1. 国土资源部, 北京 100812; 2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

1. Ministry of Land and Resources, P.R.C., Beijing 100812, China;

2. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

摘要:中国是世界上第三大冻土国,在青藏高原和东北大兴安岭地区分布着大片的多年冻土区,并有较好的天然气水合物形成条件和找矿前景。20 世纪 90 年代末就有部分科研人员开展了中国冻土区天然气水合物形成条件和分布预测的研究工作。2002 年开始,中国地质调查局先后设立了 5 个地质调查项目,对中国冻土区开展了地质、地球物理、地球化学和遥感调查工作,并在祁连山冻土区成功地钻获了天然气水合物实物样品,取得了找矿工作的重大突破,使中国成为世界上既有陆地水合物也有海底水合物的少数几个国家之一。目前中国冻土区天然气水合物研究中仍存在着调查研究程度较低、技术装备落后、未开展试生产研究等问题。随着国家对天然气水合物重视程度的加强,中国冻土区天然气水合物的调查研究进程将会进一步加快,并有可能在不久的将来实现试生产。

关键词:天然气水合物;资源;永久冻土区;中国

中图分类号:P618.13

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2011)12-1809-07

Zhang H T, Zhu Y H. Survey and research on gas hydrate in permafrost region of China. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(12):1809-1815

Abstract: China is the third largest permafrost country in the world with 2.15×10^6 km² permafrost zones, which are mainly located in the Tibetan Plateau of western China and the Da Hinggan Mountains in northeastern China, where there are fairly good formation conditions and prospects for gas hydrate. The formation conditions and potential of gas hydrate in China's permafrost have been studied since the end of the 1990s. Five projects have been implemented by China Geological Survey, in which geological, geophysical and geochemical investigation, drilling, and remote sensing survey have been performed since 2002. Gas hydrate was discovered in the Qilian Mountain permafrost in 2008, which makes China to be one of the few countries that possess both marine and permafrost gas hydrates. However, there are four problems to be solved, i.e., relatively low exploration level, backward key technique and equipment, low-level basic research and lack of trial production test. Progress of the exploration and research and production test of gas hydrate in permafrost zones will be surely accelerated in China because of the increasing attention and support from Chinese government.

Key words: gas hydrate; resources; permafrost; China

天然气水合物是由气体分子和水在低温高压条件下形成的像冰一样的固体物质,因其点火即可燃烧,俗称“可燃冰”。天然气水合物是一种规模巨大的新型潜在能源,据初步估算,全球天然气水合物资源量约为 2.1×10^{16} m³[1],是煤炭、石油和天然气资源总量的 2 倍,足够人类使用千年以上。

天然气水合物主要分布于海底沉积物和陆上永久冻土带中。迄今已在全球发现天然气水合物产地 132 处,其中海底、湖底沉积物中 123 处,陆地冻土区中 9 处。目前在冻土区发现的天然气水合物主要分布于俄罗斯、美国、加拿大等国的高纬度环北冰洋冻土区,包括美国阿拉斯加北部斜坡的

收稿日期:2011-08-31;修订日期:2011-11-23

资助项目:中国地质调查局项目《青藏高原冻土带天然气水合物调查评价》(编号:1212010818055)

作者简介:张洪涛(1949-),男,博士,研究员,从事矿产资源勘查、海洋地质和新能源研究。E-mail: zhongtao@mail.cgs.gov.cn

Brudhoe 湾-Kuparuk 河地区,加拿大 Mackenzie 三角洲和 Sverdrup 盆地,俄罗斯的西西伯利亚盆地、Lena-Tunguska 地区、Timan-Pechora 盆地、东北西伯利亚及 Kamchatka 地区,挪威的 Svalbard 半岛、格陵兰等^[2-3],而中低纬度高山冻土区尚未发现过天然气水合物。与海底水合物相比,冻土区水合物的调查、钻探和开发条件相对简单,故迄今为止天然气水合物的调查、勘探和开发均在陆上冻土区先行试验,待其取得成功后才进一步推广到海底沉积物中。

中国是世界上第三冻土大国,多年冻土面积达 $215 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[4],同时还有近 $300 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的管辖海域。在中国冻土区和南海、东海海域均具备良好的天然气水合物形成条件和找矿前景,并于 2007 年 5 月和 2008 年 11 月分别在南海北部神狐海区、青海祁连山成功地钻获了天然气水合物实物样品,取得了找矿工作的重大突破,使中国成为既有陆地水合物也有海底水合物的少数几个国家之一(中国、美国、加拿大、俄罗斯)。笔者曾于 2007 年对中国天然气水合物调查研究现状及其进展进行过简单的总结^[5],本文着重于阐述冻土区天然气水合物的调查研究历史、现状和存在的问题,并对其发展前景进行展望,供相关部门和人员参考。

1 中国冻土区天然气水合物调查研究历史

与海底水合物相比,无论是标志性事件,还是在人力、物力、财力等的投入上,中国冻土区天然气水合物均滞后于海底水合物(表 1)。但近年来对其研究进展神速,并取得了不错的成绩。初步总结起来,中国冻土区天然气水合物的调查研究大致可划分为 2002 年以前的预研究阶段,2002~2007 年的探索性调查、技术准备阶段和 2008 年以后的快速发展阶段。

自 20 世纪 90 年代中后期开始,中国就有一些学者开始关注冻土区,特别是青藏高原冻土区有没有可能形成天然气水合物,并着手收集资料、开展形成条件等方面的初步研究。徐学祖等^[9]首次指出羌塘盆地多年冻土区具备形成重烃类天然气水合物的温度和压力条件,可能存在由“自保护效应”引起的轻烃类天然气水合物,并建议开展相应的调查研究。张立新等^[10]再次肯定了青藏高原基本满足天然气水合物的形成条件,至少对于以非纯甲烷气体为主的水合物来说,形成的可能性更大。黄朋等^[11]、伊海生等^[12]也认为青藏高原,特别是羌塘盆地具备天然气水合物的形成条件。这一阶段以资料收集和分析为主,尚未开展实际调查工作。

表 1 中国天然气水合物标志性事件
Table 1 Important events of gas hydrate exploration and study in China

标志性事件	水合物基础理论	海底水合物	冻土水合物
首篇论文	1982 年: 气体水合物生成温度的下降与阻止剂水溶液冰点的下降之关系(西南石油学院, 贺承祖) ^[6]	1998 年: 南海北部陆缘天然气水合物初探(广州海洋地质调查局, 姚伯初) ^[7] /西太平洋天然气水合物矿藏找矿远景刍议(矿产资源研究所, 吴必豪等) ^[8]	1999 年: 青藏高原多年冻土区天然气水合物的研究前景和建议(中国科学院兰州冻土研究所, 徐学祖等) ^[9]
首个科研项目	1999 年: 《气体水合物生成过程机理及其分形理论的研究》(自然科学基金委, 中国科学院广州能源研究所承担)	1995 年: 《西太平洋气体水合物找矿前景与方法的调研》(大洋协会, 中国地质科学院矿产资源研究所等单位承担)	2002 年: 《青藏高原铁路沿线多年冻土区水合物先期调查研究》(矿产资源研究所)/《青藏高原多年冻土区天然气水合物地球化学勘查预研究》(中国地质调查局)
首次调查		1999 年: 西沙海槽(中国地质调查局广州海洋地质调查局)	2002 年: 青藏铁路沿线(矿产资源研究所, 中国有色金属甘肃地质勘查局地质勘查院)
首次 采获样品		1997 年 5 月: 南海北部神狐海区(中国地质调查局)	1998 年 11 月: 祁连山冻土区(中国地质调查局)

自2002年开始,中国地质调查局非常重视中国冻土区天然气水合物的调查研究工作,于2002~2007年间相继设立了《青藏高原多年冻土区天然气水合物地球化学勘查预研究》、《青藏铁路沿线天然气水合物遥感识别标志研究》、《中国陆域永久冻土带天然气水合物资源远景调查》和《陆地永久冻土天然气水合物钻探技术研究》4个地质调查项目。中国地质科学院矿产资源研究所借青藏铁路修建之机,于2002~2003年间设立项目《青藏高原铁路沿线多年冻土区水合物先期调查研究》。国家自然科学基金委也于2005~2007年间设立面上科研项目《青藏高原多年冻土区天然气水合物的形成条件探讨》,由中科院兰州冻土研究所吴青柏负责。为完成上述任务,各单位对中国冻土区,特别是青藏高原冻土区开展了地质、地球物理、地球化学、遥感等方面的探索性调查,取得了丰硕的调查资料,但调查程度相对较低,尚未发现水合物存在的确切证据,远远不能满足实际需要。与此同时,也有不少学者利用各自的优势,开展了多项研究工作,例如陈多福等^[13]根据冻土层厚度和地温梯度的特征,运用天然气水合物的热力学稳定域预测方法,确定青藏高原,特别是羌塘盆地具备天然气水合物的形成条件,并初步估算青藏高原冻土区天然气水合物中的天然气资源量为 $1.2\times 10^{11}\sim 2.4\times 10^{14}\text{m}^3$ 。刘怀山等^[14]根据地质、地球物理资料的综合分析,也认为羌塘盆地具备天然气水合物的形成条件。吴青柏等^[15]再次利用年平均地温、地温梯度、冻土层厚度等参数计算了生物成因天然气水合物形成的热力学条件,结果显示青藏高原,特别是羌塘盆地基本具备天然气水合物的形成条件。库新勃等^[16]则根据不同的地温梯度计算了青藏高原天然气水合物稳定带的厚度,编制了可能的分布范围图,并估算出天然气资源量为 $0.453\times 10^{14}\sim 298\times 10^{14}\text{m}^3$ 。

2008年,中国地质调查局继续设立地质调查项目《青藏高原冻土带天然气水合物调查评价》,并在青海省天峻县木里镇施工“祁连山冻土区天然气水合物科学钻探工程”DK-1科学钻探试验孔。11月5日,在井深133.5~135.5m段首次钻获天然气水合物实物样品,取得了找矿工作的重大突破,标志着中国冻土区天然气水合物调查研究进入了快速发展的阶段。2009年在祁连山木里地区继续施工DK-2、DK-3、DK-4钻孔,再次钻获天然气水

合物,并开展了一系列的地质、地球物理、地球化学调查工作。

2 中国冻土区天然气水合物调查

2002~2003年,中国地质科学院矿产资源研究所设立了所控项目《青藏高原铁路沿线多年冻土区水合物先期调查研究》,组织有关人员对青藏铁路沿线开展了地质、地球化学的探索性调查。系统观测了冻胀丘、冷泉冒气等现象,采集了沉积物、顶空气、地下冰、冷泉气等样品并进行相应的地球化学分析。在唐古拉山附近地区和昆仑山垭口盆地(62道班)发现可能与天然气水合物有关的多项地质、地球化学异常,认为青藏铁路沿线有可能存在天然气水合物。该项目于2003年底提交了总结报告,部分成果发表在《青藏铁路沿线多年冻土区天然气水合物的地质、地球化学异常》一文中^[17]。

2002~2004年,中国地质调查局在地质调查项目《特殊矿种地球化学找矿方法技术研究》(编号:200214200033)中设立《青藏高原多年冻土区天然气水合物地球化学勘查预研究》课题,由甘肃省有色金属地质调查院承担。调查人员在青藏公路沿线(西大滩—安多段)和羌塘盆地南缘的碧洛错—昂达尔错地区按1:10万图幅的要求系统采集了大量的地球化学样品,并进行了气态烃(相当于酸解烃)和热释汞分析,发现了一些可能与天然气水合物有关的地球化学异常,认为在多年冻土区的腹地有可能存在以甲烷、丙烷和二氧化碳为主的天然气水合物。该项目于2005年提交了科研报告,部分成果发表在《青藏高原冻土区活动带天然气水合物异常特征》一文中^[18]。

2004年,中国地质调查局设立了地质调查项目《青藏铁路沿线天然气水合物遥感识别标志研究》(编号:200420140001),由中国国土资源航空物探遥感中心承担。科研人员以MODIS和ASTER卫星数据为遥感数据源,对青藏铁路沿线开展了与天然气水合物相关信息的识别和提取方法研究,总结出温度与冻土分布、碳酸盐岩分布、间歇式烃类异常、泥火山、膏盐、蚀变共生6类冻土区天然气水合物的探测标志,认为青藏高原基本具备天然气水合物的形成条件,并指出羌塘盆地的成藏条件要好于可可西里地区。该项目于2005年底提交了成果报告。

2004~2006 年,中国地质调查局设立地质调查项目《我国陆域永久冻土带天然气水合物资源远景调查》(编号:200410100001),由中国地质科学院矿产资源研究所等单位承担。矿产资源研究所等组织有关人员对青藏高原和东北冻土区开展了一系列的地质、地球物理和地球化学调查工作。初步结果显示,中国冻土区,尤其是羌塘盆地、祁连山、风火山—乌丽地区、漠河盆地等具备较好的天然气水合物形成条件和找矿前景(图 1)。该项目于 2007 年底提交了成果报告,祝有海等^[19]依托该项目的部分调查成果,结合祁连山木里地区的实测气体组分、年平均地温、地温梯度、冻土层厚度等资料,计算了天然气水合物形成的热力学条件。结果表明,祁连山木里地区基本具备天然气水合物的形成条件,并具有良好的找矿前景。

2005~2007 年,中国地质调查局设立地质调查项目《陆地永久冻土天然气水合物钻探技术研究》,由中国地质科学院勘探技术研究所承担。相关人员对冻土区天然气水合物的钻探技术和钻探工艺开展了探索性研究,为中国冻土区天然气水合物钻探施工提供了技术支撑。该项目于 2009 年底提交了成果报告。

2008~2010 年,中国地质调查局继续设立地质调查项目《青藏高原冻土带天然气水合物调查评价》(编号:1212010818055),由中国地质科学院矿产资源研究所等单位承担。该项目的目标任务是开展青藏高原等重点冻土区天然气水合物资源远景调查,寻找青藏高原等重点冻土区存在天然气水合物的可靠证据,并对资源远景进行初步评价。同时开展冻土区天然气水合物调查方法、孔底冷冻取样器和钻进工艺研发,初步集成出合乎实际需要的调查评价方法。该项目于 2008~2009 年期间重点选择祁连山冻土区开展天然气水合物的地质、地球物理、地球化学和钻探调查工作,迄今共完成 4 个天然气水合物钻探试验孔,总进尺 2059.13m,成功地钻获了天然气水合物实物样品,取得了找矿工作的重大突破^[20]。目前该项目仍在进行中。

2009 年,中国科学院也在重要的方向性项目中设立了相应的项目,支持青藏高原多年冻土区天然气水合物研究。2009 年 9 月在昆仑山垭口盆地开展了钻探调查和地球物理方法研究,并发现了大量的气体异常,气体主要成分为甲烷,含量超过 99%,显示这一地区可能存在天然气水合物。

3 中国冻土区天然气水合物调查研究中存在的问题

尽管 10 余年来中国冻土区天然气水合物的调查研究取得了一系列进展,但由于起步晚、基础差,目前存在的问题仍然较多,主要有以下几个方面。

(1) 调查研究程度较低,资源分布状况不清

尽管已在祁连山冻土区成功钻获天然气水合物,取得了找矿工作的重大突破,但目前仅仅是发现了天然气水合物,且所有钻孔均集中在祁连山峻里木里煤田聚乎更矿区三露天井田的一条勘探线上,控制的直线距离不足 400m,尚无法确定整个聚乎更矿区天然气水合物的分布状况,也无法准确计算该地区天然气水合物的储量。羌塘盆地、漠河盆地、风火山—乌丽地区等找矿前景较好的地区也只开展了部分地质、地球物理和地球化学调查工作,尚无确切证据证实有无天然气水合物。中国其它冻土区尚未开展实质性的调查,能否形成天然气水合物、找矿前景如何尚有待于进一步工作。

(2) 勘查技术研发滞后,难以满足实际需要

国际上冻土区天然气水合物主要是依据大量油气钻井资料,特别是测井资料来确定的,缺乏成熟的天然气水合物的地质、地球物理和地球化学调查方法。尽管我们探索性地开展了一些调查方法试验和研发,但这些方法极为简陋,也不成熟,且最多只能确定一些与天然气水合物有关的异常,迄今尚无一种能直接确定天然气水合物存在的技术方法。探测海底水合物的模拟海底反射层(BSR)方法不能有效地应用于陆地冻土区,急需研发出一种类似方法来快速圈定冻土区天然气水合物的分布范围,以满足调查研究。此外,传统的钻探方法较难获取含天然气水合物的岩心,也需要开展技术研发来采集更多、更好的天然气水合物样品。

(3) 基础理论研究薄弱,水合物形成机理不明

与环北冰洋冻土区相比,中国冻土区,特别是青藏高原冻土区是典型的高山冻土,冻土层相对较薄,年平均地表地温相对较高,其天然气水合物的形成机理和形成过程肯定有别于极地冻土。同时,祁连山冻土区所发现的天然气水合物具有埋深浅、气体组分复杂、以热解气为主、型结构等显著特征,是一种新类型的水合物^[20],其控矿因素、形成机理、形成过程等尚未进行系统研究。

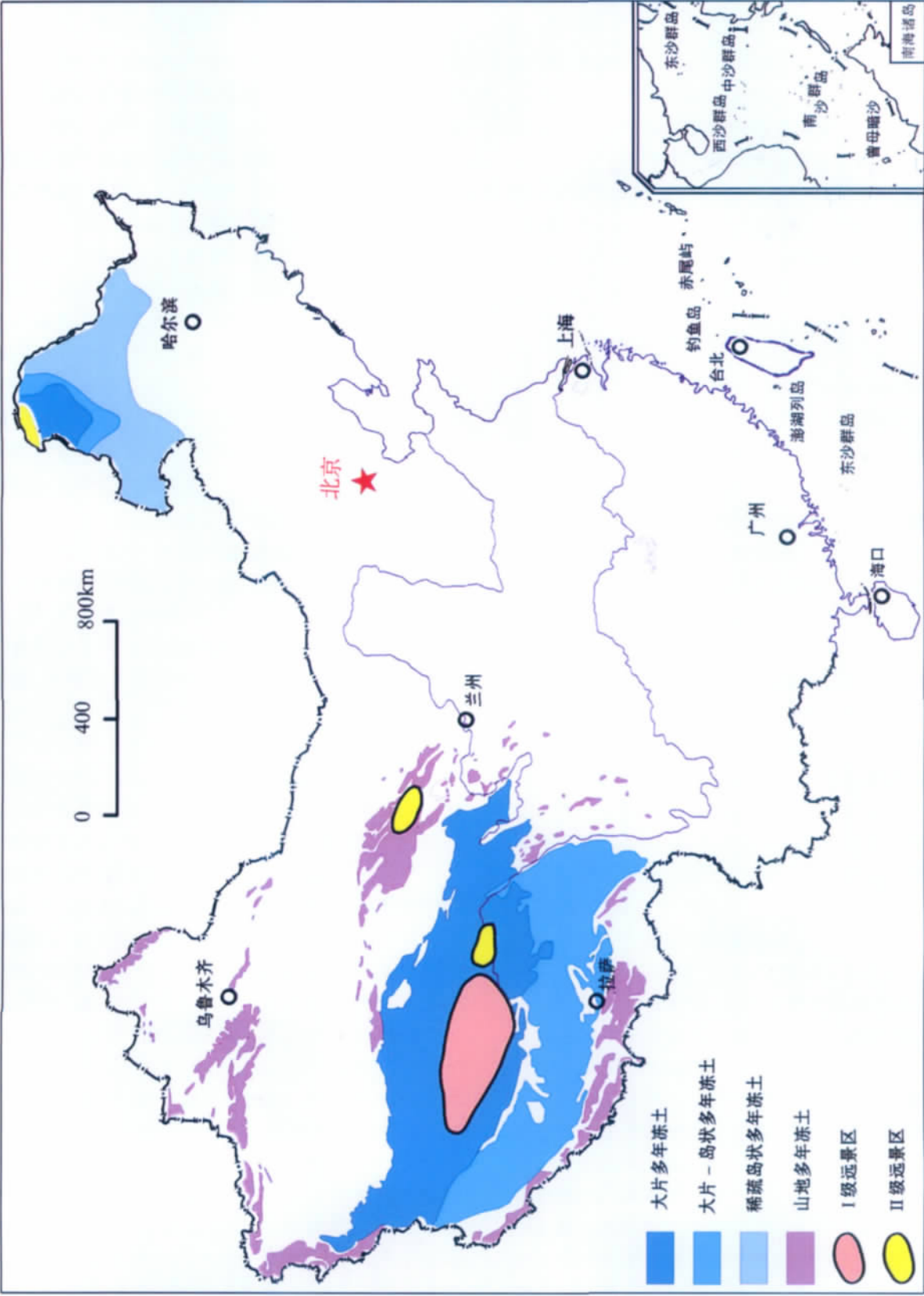


图 1 中国冻土区天然气水合物找矿远景区预测(冻土分布范围根据参考文献[4])
Fig. 1 Potential distribution of gas hydrate in permafrost regions of China

(4) 试生产研究和环境效应研究有待加强

如前所述,陆地冻土区天然气水合物的开采难度远低于海底水合物,目前正在加拿大 Mackenzie 和美国阿拉斯加冻土区开展天然气水合物试生产研究,待其成功后再推广到海底水合物。祁连山冻土区发现的天然气水合物可为中国的水合物开采试验提供良好场所,但迄今尚未进行相应的试验研究。天然气水合物的环境效应也是一个重要的研究领域,中国也有些学者开展过冰川退缩、冻土融化(冻土层减薄)对天然气水合物的影响,但对天然气水合物勘查、开发过程中的环境影响和防治对策尚未开展研究。

4 中国冻土区天然气水合物调研开发思路

针对中国冻土区天然气水合物调查研究现存的问题,应尽快查明天然气水合物资源的分布状况和资源潜力,并争取早日将这一规模巨大的潜在能源转化为现实能源,建议采用下列对策来加速中国冻土区天然气水合物的调查研究和开发利用进程。

(1) 海陆并举,加速查明资源分布状况和潜力

如前所述,中国是世界上既有海底水合物也有冻土区水合物的几个国家之一。近年来的调查研究结果表明,中国南海、东海和陆上冻土区具备良好的天然气水合物形成条件,并在南海神狐地区和祁连山冻土区成功地钻获了天然气水合物实物样品,在东海发现有 BSR 和其它地质、地球化学异常标志,在青藏高原和东北冻土区也发现一些可能与水合物有关的异常标志,显示出良好的找矿前景。但天然气水合物的分布状况不清,资源潜力不明。因此,建议充分发挥中国得天独厚的自然地理优势,坚持海陆并举的方针,以南海和青藏高原冻土区为重点,兼顾东海和其它冻土区,全面开展天然气水合物资源调查,尽快查明中国天然气水合物的分布状况和资源潜力,形成海陆齐飞的局面。

(2) 统一规划,开展能源矿产综合评价和开发

煤、石油、天然气、天然气水合物等能源矿产在时空分布上往往存在着密切联系,特别是陆上冻土区天然气水合物常常与常规油气密切共生,如俄罗斯的麦索亚哈、加拿大的 Mackenzie、美国的阿拉斯加等,甚至这些冻土区的天然气水合物均是通过常规油气井的测井资料解释发现的。中国冻土区也存在类似现象,如祁连山冻土区天然气水合物科学钻探试验井内就钻遇到天然气水合物、煤、油页岩,甚

至还有煤层气和油迹显示。有可能存在天然气水合物的羌塘盆地、漠河盆地等也是中国常规油气的战略选区。近年来国内外的调查研究也表明,非活动陆缘深水区往往发育有多期叠合盆地,因其物源、温压、构造和沉积条件的内在关联性,常常形成深部石油-中部天然气-上部天然气水合物的“三位一体”烃类能源共生模式,且水合物层往往是下伏天然气和石油的良好盖层。从调查评价角度出发,天然气水合物和其它能源矿产的调查手段大同小异,可以借用其它能源矿产,特别是常规油气的地质、地球物理、地球化学、钻探和测井技术为天然气水合物调查评价服务,甚至可以直接使用其它能源矿产的调查数据进行重新处理和解释,以满足天然气水合物调查评价所需。从开发角度出发,若先采出水合物层下的天然气(游离气),水合物层的压力将自然降低,促使水合物分解并释放出天然气进行回收,俄罗斯麦索亚哈气田区水合物的开发就是利用这种原理进行的。由此可见,这种先开采下部天然气,再采上部水合物的综合开发方案有可能是以后大规模开采天然气水合物最有效、最经济的方案。因此,建议有关部门统一规划,对天然气水合物、石油、天然气、煤、煤层气、油页岩等常规和非常规能源矿产进行综合找矿、综合开发,以利于节约成本、提高工作效率,加快天然气水合物的勘查开发进程。

(3) 加快利用,尽早开展天然气水合物试生产

尽管天然气水合物规模巨大,但因开发问题未能彻底解决,目前仍只能列为潜在能源而非商业能源。近年来,不少国家都相当重视天然气水合物的开发利用研究,调查研究的重点逐渐从资源调查向开发利用过渡。如俄罗斯麦索亚哈气田自 1969 年起就开始先开采下部的天然气,再开采上部的水合物,截止到 2004 年底已从水合物中生产出约 $6.9 \times 10^9 \text{ m}^3$ 的天然气^[21]。2002 年春,美国、日本、加拿大、德国、印度五国八方合作的《Mallik2002》项目对加拿大马更些冻土区的天然气水合物成功开展了短期试生产,5 天多的加热法试生产共回收了 468 m^3 的天然气。2007~2008 年,加拿大、日本再次合作在马更些冻土区开展了 2 次试生产研究,分别从水合物中生产了 830 m^3 和 13000 m^3 的天然气。2007 年,壳牌阿拉斯加分公司、美国能源部、美国地调局等在阿拉斯加北部水合物分布区开展钻探、测井及采样工作,成功地钻获了水合物样品,目前正在开展试生产工作。同时,

许多国家的研发计划都将天然气水合物的开发利用列为重要内容(各国的研发计划一般包括资源调查、开发利用和环境影响三大部分),如美国、日本、印度、韩国等国的研发计划中均要求在2015年前后实现天然气水合物的商业性开发。此外,也有不少学者对天然气水合物的开发利用前景进行了科学预测,如 Grauls^[22]认为2015年后有可能实现冻土区水合物的商业性开发,2030年后实现海底水合物的商业性开发,而 Bil^[23]则认为这一时间段分别在2015年和2060年。目前,中国正在积极关注国际上开发利用方面的研究成果和进展,推进各相关领域的国际合作,利用祁连山冻土区发现天然气水合物的先发优势,尽快开展试生产研究,以便将这一规模巨大的潜在能源尽早转化为商业能源。

(4)环境优先,提前开展环境效应和防治对策研究

天然气水合物中的甲烷是一种温室效应非常强烈的气体,具有巨大的环境效应。天然气水合物究竟是“上帝的恩赐”还是“诱人的陷阱”或是“潘朵拉”盒子,社会各界众说纷纭,这也是部分学者怀疑天然气水合物能否成为商业能源的根本原因。天然气水合物的环境效应已引起世界各国的高度重视,并开展了多方面的调查研究,主要的研究方向包括如下3个方面:①天然气水合物分解产生的甲烷气体引起全球气候变化;②天然气水合物分解产生的富甲烷流体引起海洋生态环境恶化、生物灭绝等;③天然气水合物分解导致沉积物失稳而引起的滑坡、海啸等地质灾害。对中国而言,青藏高原是制约中国环境变化的关键,全球变暖、冻土退缩将影响天然气水合物的形成与分解过程,而天然气水合物的勘查与开发也将对环境产生影响。因此,建议有关部门在开展冻土区天然气水合物资源调查的同时,尽早开展环境效应研究,确保冻土区天然气水合物的勘查和开发不影响到原本就脆弱的青藏高原生态环境。

目前,中国陆上冻土区天然气水合物的调查、研究、开发力度不断加大,资源潜力的评价将从远景资源量发展、精确到地质储量,开采技术研发也将从起步研究推进到现场试验。中国天然气水合物的商业性开发可以期待。

参考文献

[1]Milkov A V. Global estimates of hydrate-bound gas in marine sediments: how much is really out there? [J] Earth-Science Reviews, 2004, 66: 183-197.

- [2]Collett T S, Dallimore S R. Permafrost-related natural gas hydrate[C]//Max M D. Natural Gas Hydrate in Oceanic and Permafrost Environments. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2000:43-60.
- [3]Dallimore S R, Collett T S. Summary and implication of the Mallik 2002 gas hydrate production research well program[C]//Dallimore S R, Collett T S. Scientific Results from the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program, Mackenzie Delta, Northwest Territories, Canada. Geological Survey of Canada, Bulletin, 2005, 585: 1-36.
- [4]周幼吾, 郭东信, 邱国庆, 等. 中国冻土[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 1-450.
- [5]张洪涛, 张海启, 祝有海. 中国天然气水合物调查研究现状及其进展[J]. 中国地质, 2007, 34(6): 953-961.
- [6]贺承祖. 气体水合物生成温度的下降与阻止剂水溶液冰点的下降之关系[J]. 化工学报, 1982, (4): 383-387.
- [7]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.
- [8]吴必豪, 马开义, 陈邦彦, 等. 西太平洋天然气水合物矿藏找矿远景刍议[J]. 矿床地质, 1998, 17(增刊): 741-744.
- [9]徐学祖, 程国栋, 俞祁浩. 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, 1999, 14(2): 201-204.
- [10]张立新, 徐学祖, 马巍. 青藏高原多年冻土与天然气水合物[J]. 天然气地球科学, 2001, 12(1/2): 22-26.
- [11]黄朋, 潘桂棠, 王立全, 等. 青藏高原天然气水合物资源预测[J]. 地质通报, 2002, 21(11): 794-798.
- [12]伊海生, 时志强, 刘文军. 青藏高原多年冻土区天然气水合物形成潜力及远景[J]. 西藏地质, 2002, 20(1): 46-49.
- [13]陈多福, 王茂春, 夏斌. 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, 2005, 48(1): 165-172.
- [14]刘怀山, 韩晓丽. 西藏羌塘盆地天然气水合物地球物理特征识别与预测[J]. 西北地质, 2004, 37(4): 33-38.
- [15]吴青柏, 蒋观利, 蒲毅彬, 等. 青藏高原天然气水合物的形成与多年冻土的关系[J]. 地质通报, 2006, 25(1/2): 29-33.
- [16]库新勃, 吴青柏, 蒋观利. 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, 2007, 18(4): 588-592.
- [17]卢振权, 吴必豪, 饶竹, 等. 青藏铁路沿线多年冻土区天然气水合物的地质、地球化学异常[J]. 地质通报, 2007, 26(8): 1029-1040.
- [18]坚润堂, 李峰, 王造成. 青藏高原多年冻土区活动带天然气水合物异常特征[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2009, 31(2): 13-17.
- [19]祝有海, 刘亚玲, 张永勤. 祁连山多年冻土区天然气水合物的形成条件[J]. 地质通报, 2006, 25(1/2): 58-63.
- [20]祝有海, 张永勤, 文怀军, 等. 青海祁连山冻土区发现天然气水合物[J]. 地质学报, 2009, 83(11): 1762-1771.
- [21]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.
- [22]Grauls D. Gas hydrate: importance and applications in petroleum exploration[J]. Marine and Petroleum Geology, 2001, 18: 519-523.
- [23]Bil K J. Economic perspective of methane from hydrate[C]//Max M D. Natural gas hydrate in oceanic and permafrost environments. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 2000: 349-360.