

文章编号: 100 1281 66(2008) 0220 111209

多年冻土区天然气水合物研究综述

吴青柏, 程国栋

(中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 由于多年冻土区天然气水合物潜在的资源价值和对气候、环境的影响, 各国纷纷开展了大量的研究, 取得了很好的研究进展。主要分析了天然气水合物与多年冻土间的关系、多年冻土区天然气水合物的蕴藏情况以及典型多年冻土区天然气水合物研究现状。结果表明多年冻土控制了天然气水合物形成的温压条件, 且在多年冻土层间存在着具有自保护效应的天然气水合物。同时多年冻土可影响分散性土体中游离气体的聚集和迁移, 多年冻土融化可提高孔隙水压力。目前多年冻土区天然气水合物的蕴藏情况的估算并不完整, 各国仅对典型多年冻土区天然气水合物储量进行了初步估算。估算结果表明, 在美国阿拉斯加地区大约为 $1.0 \times 10^{12} \sim 1.2 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 加拿大马更些三角洲博福特 (Beaufort) 地区大约为 $1.6 \times 10^{13} \text{ m}^3$, 俄罗斯西西伯利亚盆地 250 m 深度范围内可达 $1.7 \times 10^{13} \text{ m}^3$ 。我国青藏高原多年冻土区亟待搞清天然气水合物存在与否的直接证据和储量估算等关键问题。

关 键 词: 天然气水合物; 多年冻土; 青藏高原

中图分类号: P618.13 TE122.1⁺ **文献标识码:** A

1 概 述

天然气水合物是在低温高压下由水与小客体气体分子组成的类冰、非化学计量、笼形固体化合物, 俗称/可燃冰。在高压低温条件下天然气水合物主要有 sI、sII 和 H 型 3 种结构类型^[1, 2]。在 2.0~10 GPa 超高压下可形成 MH 2II 和 MH 2III 新型水合物结构类型^[3], 该结构类型水合物据推测多形成于其他星球, 如火星、土星、彗星等^[3, 4]。甲烷、乙烷和其他烃类气体能够被包含在笼状结构中形成水合物, 甲烷水合物是自然界最常见的一种水合物^[5]。

地球上天然气水合物蕴藏量十分丰富, 天然气水合物广泛分布于多年冻土区、大陆架边缘的深海沉积物和深湖泊沉积物中, 估计全球天然气水合物中的碳储量为 $2 \times 10^{16} \text{ m}^3$, 相当于全球已探明常

规化石燃料总碳量的 2 倍以上^[5]。天然气水合物的一些重要属性决定了其在工业和环境领域中具有重要意义。首先, 天然气水合物是一种潜在的新的洁净能源, 其资源储量极为丰富, 已经引起了各国极大的兴趣; 第二, 由于蕴含在自然界中大量甲烷气水合物中的甲烷气体是一种特殊的潜在温室气体, 且温室效应相当于同等重量 CO_2 的 20 倍^[6, 7], 因此甲烷气水合物被认为在过去和未来的全球气候变化起着重要作用^[8, 9]; 第三, 由于浅层气体释放和海底不稳定, 特别是在极地和深水水合物稳定带内天然气水合物的分解具有较大的危害性^[10]; 第四, 天然气水合物存在对输气(油)管道流动安全产生重大影响^[11, 12]。

分布于多年冻土区的天然气水合物与多年冻土热状态、多年冻土厚度等有密切的关系。目前在多

* 收稿日期: 2007209230 修回日期: 2007212220

* 基金项目: 国家自然科学基金项目/青藏高原多年冻土区天然气水合物的形成条件探讨 0 (编号: 40471024); 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所创新项目/多年冻土区天然气水合物形成条件研究 0 资助。

作者简介: 吴青柏 (1964), 男, 江苏常州人, 研究员, 主要从事冻土工程与环境与多年冻土区天然气水合物研究。

E2mail: qbwu@lzb.ac.cn

年冻土区已经发现有大量的天然气水合物,如加拿大马更些三角洲、阿拉斯加北坡和俄罗斯西伯利亚等。近年来青藏高原多年冻土区是否存在天然气水合物引起了较大的关注。本文主要就多年冻土与天然气水合物关系和多年冻土区天然气水合物蕴藏情况进行讨论,同时对典型多年冻土区天然气水合物研究现状作简要介绍,并展望未来的研究和亟待解决的科学问题。

2 多年冻土与天然气水合物间的关系

对于多年冻土区天然气水合物形成,最重要的因素是地热梯度、气体组分、孔隙流体盐度、孔隙压力等,其中地热梯度和气体组分最为重要。这 2 个因素决定了多年冻土区天然气水合物形成的温压条件和储藏量^[13]。地热梯度越小,那么天然气水合物可以在更大深度的地质环境条件下形成;气体组分决定了天然气水合物的相平衡状态,比如甲烷水合物形成时的温压条件要比丙烷水合物形成条件苛刻得多^[2]。多年冻土区天然气水合物的形成需要充足的烃类气源、地下水、适合的温度和压力 4 个基本条件。烃类气源和地下水也许与多年冻土无关;但温度和压力条件与多年冻土有密切的关系,受到了多年冻土热状态、多年冻土厚度以及多年冻土层下地热梯度等的控制和影响^[13, 14]。

2.1 多年冻土条件控制天然气水合物形成的温压条件

图 1 给出了多年冻土区天然气水合物稳定带的示意图。由图 1 可知,多年冻土地温梯度与多年冻土层下地热梯度与气水合物的相平衡边界共同构成了天然气水合物的稳定带,灰色区域内为天然气水合物的稳定带,理论上天然气水合物均可以在这一区域内形成。多年冻土地温梯度越小,多年冻土厚度越大,温度和压力条件就越有利于形成天然气水合物,其稳定带厚度也越大。由于多年冻土底板处温度为 0℃,所以多年冻土底板深度越大,多年冻土层下天然气水合物稳定带的下界深度越大。一旦多年冻土发生退化,多年冻土底板变浅,多年冻土减薄,温度升高可能导致气水合物分解。从图 1 看出,控制多年冻土区天然气水合物形成的主要因素为多年冻土地温梯度和年平均地温以及多年冻土层下融土的地热梯度,前二者控制多年冻土厚度,后者控制天然气水合物的底板深度。

2.2 多年冻土影响气体的聚积和迁移

由于多年冻土是渗透性极低的地质体,被认为

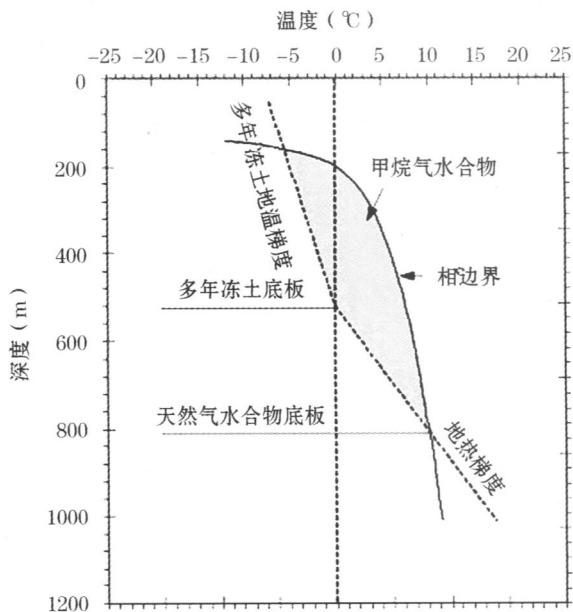


图 1 多年冻土与气水合物关系示意图^[1]

Fig 1 Sketch map of relations between permafrost and methane hydrates

是很好的隔水层。因此,多年冻土层可有效地阻止其下部游离气体向上迁移和聚集,多年冻土层构成了水合物形成时必要的圈闭条件(图 2)^[15, 16]。多年冻土层的存在有利于其下部分散性沉积物中天然气在一定深度处聚集和迁移,在温度和压力条件适宜的深度处形成天然气水合物。多孔介质土体中常见有分散状、小块状、层状和大块状气水合物结构^[1],与冻土中地下冰结构类型极为相似。多年冻土区多孔介质中形成的天然气水合物结构多为层状和大块状,主要与气体聚集和迁移等有关^[1]。然而,在某些多年冻土区,游离气体会通过断裂带等地质构造迁移至地表^[17]。

2.3 多年冻土融化将提高孔隙压力

如图 1 所示,多年冻土区天然气水合物在较为狭窄的压力范围内是稳定的,但压力受到沉积速率、地应力历史和构造影响会产生波动。极地多年冻土区天然气水合物研究表明多年冻土对其层间和层下土体产生非平衡态的压缩过程^[18]。马更些三角洲冻土区深部(30~386 m)岩芯样品的融化固结实验表明,多年冻土能够阻止土体的正常固结过程。多年冻土融化或升温使得融化带和层间融区深度范围内易产生孔隙水压力升高^[19],在钻孔穿越充满气体的多年冻土层间融区时发现了这一现象的存在^[20],有 4 个钻孔资料显示多年冻土底部具有异常的超高压^[21, 22]。

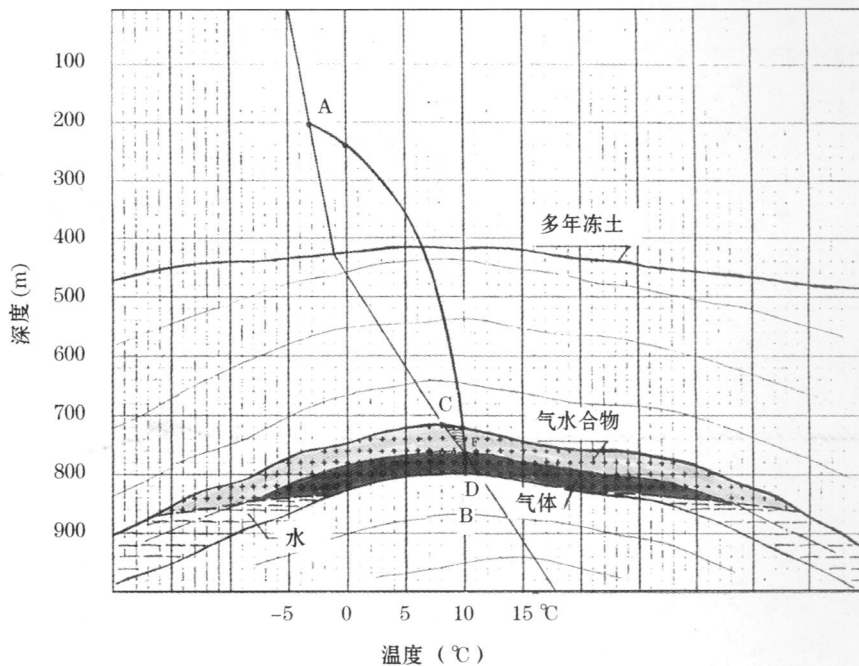
图 2 多年冻土层下气水合物形成^[15]

Fig 2 Formation of gas hydrates beneath permafrost layer

2.4 多年冻土层间天然气水合物

迄今为止,在美国阿拉斯加北坡、俄罗斯西伯利亚以及加拿大的马更些三角洲的多年冻土区都发现并获取了天然气水合物样品,且多发育在多年冻土层下 300~600 m 深处。其中多年冻土层间也发现有天然气水合物层,这一发现证实了天然气水合物自保护效应在自然界存在^[23]。

位于 Mallk 天然气水合物探井西侧 20 km 处, 92GSCTaglu 地质孔钻探时在 130 m 深度处发现,多年冻土层间天然气水合物,这是目前唯一在多年冻土层间所发现的天然气水合物实物样品^[23]。在俄罗斯西伯利亚西北部雅马尔半岛多年冻土区,通过气体释放、地球化学等,发现在多年冻土层中气体释放异常,释放出的气体量大约超过了岩芯孔隙率的 10 倍^[24-25],证实了多年冻土层间存在天然气水合物,但并未采集到天然气水合物实物样品。广大的西伯利亚多年冻土区 200~300 m 深处均发现有这种异常现象的存在。北极多年冻土区天然气水合物研究表明甲烷气水合物存在于浅层深度为 130 m 到深部 2 000 m 内,推测多年冻土层内天然气水合物最浅的深度大约为 90 m^[7]。实际上,这一深度范围内天然气水合物远远低于水合物相平衡稳定带深度,这一深度气水合物存在主要是天然气水合物在负温下自保护效应引起的^[26],减缓了天然气水合物进一步

分解,使多年冻土层间气水合物处于亚稳定状态。因此在多年冻土层间天然气水合物也被称为/残余型气水合物^[25-27]。

3 多年冻土区天然气水合物的蕴藏状况

1946 年,前苏联学者 N. H. 斯特里若夫从理论上得出结论:自然界可能存在气水合物藏。1967 年俄罗斯首次在多年冻土区发现天然气水合物^[1,4]。70 年代初美国在阿拉斯加北部普拉德霍湾 (Prudhoe Bay) 首次获取天然气水合物实物样品^[1]。70 年代末实施 DSDP 计划,首次从海域钻探的 20 个海底钻孔中发现其中 9 个钻孔中含有天然气水合物^[28]。根据地球物理方法、地球化学、钻探等研究,全世界共发现 116 处地区有天然气水合物存在的标志,其中陆地 38 处(皆在多年冻土区),海洋 78 处^[15]。据最新估算结果,海洋天然气水合物资源大约为 $2 \times 10^{16} \text{ m}^3$,多年冻土区大约为 $7.4 \times 10^{14} \text{ m}^3$ ^[29]。图 3 给出了北半球多年冻土区天然气水合物潜在的存在区域。

由于多年冻土区天然气水合物资源评估较为复杂,迄今为止尚无一个国家对本国多年冻土区的天然气水合物资源进行完整的评估。目前仅美国、俄罗斯和加拿大证实在多年冻土区含有天然气水合物,并对多年冻土区天然气水合物资源量进行了评

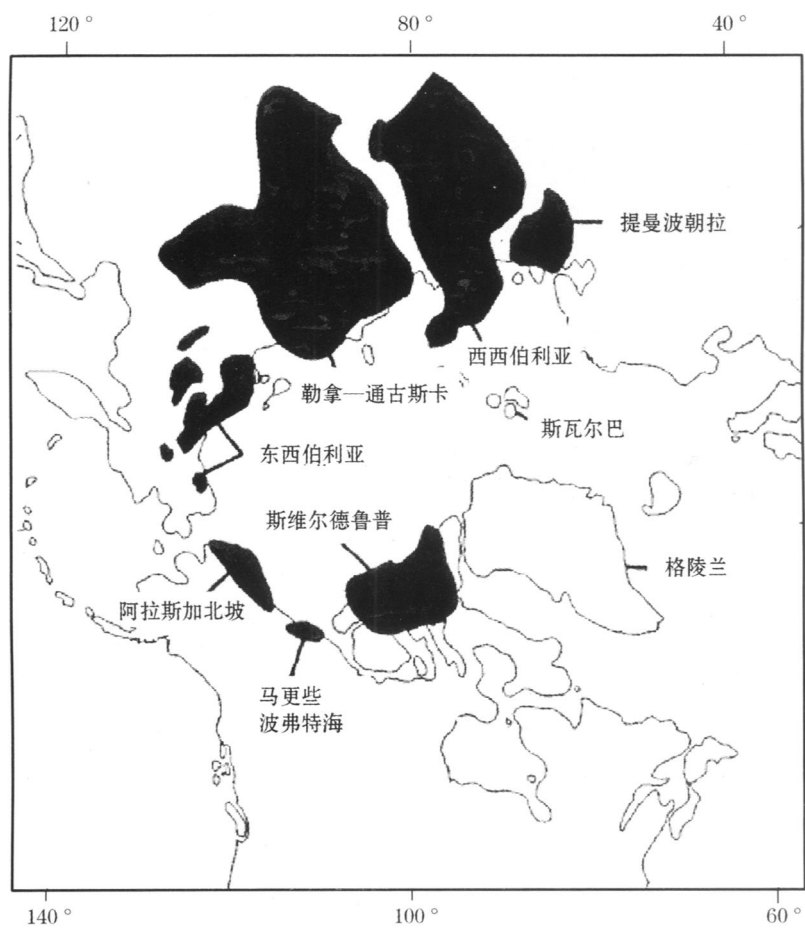


图 3 北半球多年冻土区天然气水合物潜在的存在区域^[16]

Fig 3 Potential regions of gas hydrate occurrence in permafrost regions in Northern Hemisphere

表 1 多年冻土区天然气水合物资源

Table 1 Gas hydrates reserves in permafrost regions

国家	地区	潜在资源量 (m ³)	相关证据	参考文献
美国	阿拉斯加地区	1.0 @10 ¹² ~ 1.2 @10 ¹²	测井、样品	Collett 2002
加拿大	马更些三角洲地区	1.6 @10 ¹³	测井、样品	Smith and Judge, 1995
俄罗斯	西伯利亚盆地	1.7 @10 ¹³	样品、天然气	Yakvshoy 2005

估 (表 1)。美国 USGS 在 1995 年系统地评估了美国能源现状, 这次评估包含了海洋和陆地的天然气水合物资源。但是陆地的天然气水合物仅评估了阿拉斯加北坡地区的天然气水合物, 总量约为 $1.0 @ 10^{12} \sim 1.2 @ 10^{12} \text{ m}^3$ ^[30]。加拿大在北极地区开展了大量的天然水合物研究, 马更些三角洲多年冻土区钻取了大量的天然气水合物, 初步估计马更些三角洲博福特 (Beaufort) 海地区也许会有 $1.6 @ 10^{13} \text{ m}^3$ 的天然气水合物储量^[31]。俄罗斯西西伯利亚盆地多年冻土区存在有大量天然气水合物, 包括季曼)伯朝拉 (Timan-Pechora) 省, 西西伯利亚 Craton 和西西伯利亚西北部以及堪察加 (Kamchatka) 地区^[32]。但

俄罗斯仅对 250 m 多年冻土层内残余型天然气水合物资源进行了评估, 预测多年冻土层内天然气水合物的总资源量可达 $1.7 @ 10^{13} \text{ m}^3$ ^[27]。我国并未在多年冻土区发现有天然气水合物, 但较多学者认为青藏高原多年冻土区具有良好的天然气水合物远景^[33~38], 并提出了可能存在的预测, 估计为 $1.2 @ 10^{11} \sim 2.4 @ 10^{14} \text{ m}^3$ ^[37]。

4 多年冻土区典型区域天然气水合物研究

自多年冻土区发现天然气水合物以来, 在多年

冻土区就开始对天然气水合物的地质成因、地球物理和化学勘探方法、资源评估、对气候变化和环境的影响和天然气水合物开采进行了研究。目前在美国阿拉斯加北坡、加拿大马更些三角洲 Mallik 井和俄罗斯麦索雅哈获得了大量极宝贵的数据和资料, 为多年冻土区天然气水合物开采打下了良好的基础。下面分别介绍多年冻土区典型研究区的天然气水合物的研究历史和现状。

4.1 马更些三角洲地区天然气水合物

马更些三角洲多年冻土区 Mallik 研究井位于加拿大西北部博福特海沿岸, 是目前世界上天然气水合物研究井最密集的研究区, 天然气水合物研究历史超过 30 年。早在 1970) 1972 年通过 Mallik L238 探测井的井记录和钻孔堵塞证实和发现了天然气水合物存在的证据^[39]。1980) 1990 年间对该地区天然气水合物资源进行调查和评估, 开展了 145 个钻孔调查, 其中 25 个 (17%) 钻孔证实了天然气水合物的存在^[31, 40], 天然气水合物主要发育在多年冻土层下 300~700 m 深度范围内, 92GSCTagli 地质孔发现了多年冻土层间发育有天然气水合物^[23]。1998 年加拿大、美国和日本在 Mallik L238 研究井场地开展了科学与工程联合研究, 并钻取了 Mallik 2L238 研究井, 主要研究了多年冻土层内和层下烃类气体的来源和组成, 分析了 3 个主要研究井的烃类气体的地球化学特征^[41]。研究表明, 多年冻土层内含有大量微生物成因的甲烷气体, 是在原地形成的; 多年冻土层下气体主要为热成因的, 是从下部迁移并聚集的^[17]。

2002 年加拿大、日本、德国、美国和印度联合在 Mallik L238 场地开展了天然气水合物开采和经济比选的试验研究, 评价了天然气水合物对区域环境、地质灾害和气候变化的影响。为此, 在 2001) 2002 年间完成了 Mallik 3L238、4L238 和 5L238 三个天然气水合物的钻井工作。开展了小尺度的减压和热模拟开采试验, 分别在多年冻土层下天然气水合物稳定带内测量减压时的压力、温度、水和气体流量等参数, 证实了通过减压和热模拟方法开采天然气水合物的可行性^[42, 43], 获得了极为重要的研究成果:

(1) 开采试验中研制并应用了新工具和新程序; 从一系列限制性和控制性开采试验中获得了大量的气体, 研究了现场天然气水合物对压力或温度变化的响应、不同沉积物类型、气水合物饱和度、气水合物的相平衡等对气水合物开采的影响。

(2) 现场和实验室内获得了天然气水合物开采

模型所需要的重要参数, 包括沉积物渗透性、热流、导热系数、气体水合物相平衡资料、地质力学性质和天然气水合物的结构和物理性质。

(3) 开采试验结果和其他项目结果检验了天然气水合物开采模拟, 并用该模拟器模拟了 Mallik 5L238 天然气水合物热模拟开采试验。

4.2 阿拉斯加北坡天然气水合物

1972 年在阿拉斯加北坡普拉德霍见西北部 E2 leen State22 井中证实了多年冻土区天然气水合物的存在, 随即开展了保压岩芯取样、测井和开采试验, 证实了该处有 3 层天然气水合物存在^[26, 43], 天然气水合物岩芯和测井记录都充分显示在普拉德霍见和库帕勒克 (Kuparuk) 河油田地区存在有大量的天然气水合物。1995 年美国对阿拉斯加地区天然气水合物分布和资源量进行评估, 给出了阿拉斯加多年冻土区天然气水合物的资源量。

1998 年美国支持开展天然气水合物研究和开采试验计划研究, 项目由 USGS、加拿大地质调查局以及日本国家石油公司共同联合开展。主要开展地质、地球物理、地球化学、钻探、开采等研究, 评价现场天然气水合物的特征, 测试一系列天然气水合物开采的新工程技术^[44]。2003) 2004 年美国能源部资助开展了 /Hot ice210 项目研究, 主要开展多年冻土区的天然气水合物的室内和现场试验研究, 证实极地天然气水合物发生的地质、地球物理和地球化学模型的有效性^[45, 46]。同时美国能源部和 BP 勘测公司也开展了定量评价天然气水合物开采的经济价值相关研究, 目前该研究正在进行中。

4.3 西伯利亚天然气水合物

俄罗斯西西伯利亚盆地多年冻土区天然气水合物并不为人所知, 主要是因为气田钻探过程中要求迅速通过多年冻土层, 从而忽视了多年冻土层内天然气水合物存在的证据^[25]。然而, 西伯利亚的杨堡 (Yamburg) 和 Bovanenkovo 气田多年冻土层内气体释放研究发现, 多年冻土层内存在大量的天然气水合物^[25, 32, 47]。因此俄罗斯在西伯利亚广泛地开展了多年冻土层内天然气水合物研究, 研究区主要集中在西伯利亚北部的杨堡和 Bovanenkovo 等地区。通过对西伯利亚多年冻土层内气体释放的研究, 初步划定了多年冻土区天然气水合物的区域, 给出了多年冻土区内天然气水合物的储量估算。

全球范围内只有俄罗斯西伯利亚麦索雅哈天然气水合物矿藏开始了工业性开采, 其常被当作现场开采天然气水合物的一个例子, 至今已有近 40 年历

史。麦索雅哈气田开采期间,先后完成了地球物理调查、气体动力学、温度测量、物理)化学的调查^[48]。麦索雅哈天然气水合物矿藏开采历史证实,多年冻土区天然气水合物是可以常规方法进行开采的,且可以通过简单的减压方法获得长期开采量。然而,从麦索雅哈气田开采历史,不是所有开采的游离气体均来自于天然气水合物,据估计大约只有 30% 的气体来自于天然气水合物。在天然气水合物下部含有大量的可开采的气体,这对于资源利用是极有价值的^[49]。麦索雅哈气田开采说明天然气水合物存在可作为油气资源重要指示,对天然气矿藏探测具有非常重要的意义。

5 未来挑战

评估全球范围内多年冻土区天然气水合物,具有极为重要的能源意义和环境意义。然而,由于多年冻土存在,在海洋探测中广泛使用的似海底模拟反射层(BSR)这一方法基本不适合多年冻土区天然气水合物勘测;在多年冻土区主要是基于钻探方法开展天然气水合物的勘测。尽管在马更些三角洲地区和阿拉斯加北坡地区开展了大量的地球物理、地球化学以及测井技术的研究,但目前仍未找到一种非常适合于多年冻土区天然气水合物的综合勘测技术。因此,要开展多年冻土区天然气水合物的区域调查,准确地估算多年冻土区天然气水合物储量,必须研究适合于多年冻土区天然气水合物的勘测技术。

由于多年冻土是一种对气候和人类活动极为敏感的不稳定地质体,气候转暖导致北半球多年冻土退化^[50]。研究结果显示过去几十年来阿拉斯加北部多年冻土温度升高了 2~3e^[51-52],马更些三角洲北部多年冻土 20~30 m 深处温度升高了 1e^[53],西伯利亚盆地多年冻土温度发生了显著的升温^[54],青藏高原多年冻土温度普遍升高^[55-56]。多年冻土退化必然造成甲烷气水合物分解并释放,对全球气候转暖产生重要影响。Nisbet^[57]认为 13.5 ka 前末次冰期的结束,与水合物分解大量 CH₄ 进入大气圈有关。Paul 等^[58]认为水合物的形成与分解对全球气候变化具有调节作用。有证据显示始新世末、早白垩世、晚侏罗世、早侏罗世等时段大量甲烷气水合物分解并释放 CH₄ 导致了全球升温^[59-63]。Kvenvolden^[6]指出极地多年冻土区甲烷水合物对气候转暖更为敏感。阿拉斯加冰盖下部 CH₄ 甲烷的浓度比大气中的平均浓度高 6~28 倍,如果仅释放 1%,将对全球气候产生重大影响^[6]。因此多年冻土区甲

烷气水合物调查和储量评估是亟待解决的重大问题。

海洋中天然气水合物的形成深度较大,加之海洋的复杂环境,天然气水合物开采难度较大。虽然利用各种技术和方法在海洋中发现有大量的天然气水合物,但至今尚无一个国家对海洋天然气水合物进行开采试验研究。与陆地多年冻土区相比,美国、日本、加拿大、德国等在马更些三角洲和阿拉斯加北坡地区对多年冻土区天然气水合物作了大量的开采试验和经济方案比较,取得了可供开采海洋天然气水合物参考的经验和科学依据。目前已在多年冻土区开采了天然气水合物(麦索雅哈气田)。与海洋相比,陆地开采天然气水合物的难度要小得多,同时陆地上开展天然气水合物开采试验无疑为海洋大规模开发天然气水合物提供良好的基础。我国在南海北部发现并获得了天然气水合物实物样品,为了提高南海天然气水合物的开采水平,应积极开展青藏高原多年冻土区天然气水合物存在的相关证据研究,为开采海洋天然气水合物打下坚实的基础。

青藏高原是世界上海拔最高的多年冻土区,多年冻土面积约为 140@10⁴ km²。青藏高原多年冻土区基本具备形成天然气水合物的温压条件^[33-38]。陈多福等^[37]根据青藏高原多年冻土区天然气水合物的温压条件,给出了该区天然气水合物的估算储量。过去几十年来青藏高原多年冻土区钻探过程均发现多年冻土下部具有大量的气体存在。青藏高原多年冻土具有厚度薄、地温高的特点,多年冻土区是否存在天然气水合物,长期以来受到人们的广泛关注。青藏高原多年冻土正在经历着强烈退化,亟待搞清天然气水合物存在的相关证据和潜在区域等关键问题。

参考文献 (References):

- [1] Sloan E Dendy Clathrate Hydrates of Natural Gases [M]. New York: Marcel Dekker, Inc. 1990.
- [2] Sloan E Dendy Fundamental principles and applications of natural gas hydrates [J]. Nature 2003, 426(20): 3532359.
- [3] Carolyn A Koh Towards a fundamental understanding of natural gas hydrates [J]. Chemical Society Review, 2002, 31: 1572167.
- [4] Shi Dou, Sun Chengquan, Zhu Yuenian. Development and Research of Natural Gas Hydrate in Abroad [M]. Lanzhou: Lanzhou University Press, 1992 [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.]
- [5] Kvenvolden K A Potential effects of gashydrate on human welfare [C] M Proceeding of National Academy of Science Colloquium USA, 1999, 96 3 42023 426.

- [6] Kvenvolden K A Gas Hydrate geologic perspective and global change[J]. Reviews of Geophysics, 1993, 31: 173.
- [7] Kvenvolden K A Methane hydrate: A major reservoir of carbon in the shallow geosphere? [J]. Chemical Geology, 1988, 71: 41251.
- [8] Dickens G R A methane trigger for global warming? [J]. Science, 2003, 299: 1 017.
- [9] Judes A S Majorowicz J A Geothermal conditions for gas hydrate stability in the Beaufort Mackenzie area The global change aspect [J]. Global and Planetary Change, 1992, 6(2/4): 2512263
- [10] Wang Shuhong Song Habin Yan Wen Environmental effects of natural gas hydrate[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2004, 23(2): 1602165 [王淑红, 宋海斌, 颜文. 天然气水合物的环境效应 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2004, 23(2): 1602165]
- [11] Hammerschmidt E G. Formation of gas hydrates in natural gas transmission lines [J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1934, 26: 851
- [12] Lingelsen M N, Majeed A I, Strange E. Industrial experience in evaluation of hydrate formation, inhibition and dissociation in pipeline design and operation[C] M 1st International Conference on Natural Gas Hydrates New York Academy of Sciences, 1994 715: 75
- [13] Collett T S Bird K J Kvenvolden K A et al Geological interpretations relative to gas hydrates within the North Slope of Alaska [C] M US Geological Survey Open File Report 1988, 150 882 389
- [14] Collett T S. Energy resource potential of natural gas hydrates[J]. AAPG, 2002, 86(11): 1 97121 992
- [15] Yin Haisheng Shi Zhiqiang Liu Wenjun et al. Potentiality and perspective of natural gas hydrate in ever-frozen ground region of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Tibet Geology, 2002, 20(1): 452 52 [伊海生, 时志强, 刘文均, 等. 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): 452 52]
- [16] Collett T S Bird K J Kvenvolden K A, et al Geological interpretations relative to gas hydrate within the north slope of Alaska [C] M Final Report DE2A 121283MC20422, US Department of Energy 1988.
- [17] Collett T S Dallimore S R Hydrocarbon gases associated with permafrost in the Mackenzie Delta Northwest Territories Canada [J]. Applied Geochemistry, 1999, 14 6072620.
- [18] Serebryakov V A, Chilingar G V, Katz S A. Methods of estimating and predicting abnormal formation pressures[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1995, 13 1132123
- [19] Cathro D S. Specialized deep core testing of samples from the cross-delta transect [C] M Dallimore S R, Matthews J V. The Mackenzie Delta Borehole Project Environmental Studies Research Funds Report 135, 1977.
- [20] Dallimore S R, Matthews J V, eds The Mackenzie delta borehole project[C] M Environmental Studies Research Funds Report 135, 1997.
- [21] Weaver J S, Stewart J M. In situ hydrates under the Beaufort shelf [C] M French M H, ed Proceedings of the Fourth Canadian Permafrost Conference 1981 National Research Council of Canada The Roger J E. Brown Memorial Volume 1982 3122 319.
- [22] Hitchon B Underschultz J R, Bachu S et al Hydrogeology, geologic pressures and hydrocarbon occurrences Beaufort Mackenzie basin [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1990, 38 2152 235.
- [23] Dallimore S R, Collett T S Intrapermafrost gas hydrate from a deep corehole in the Mackenzie delta Northwest Territories Canada [J]. Geology, 1995, 23 5272530
- [24] Yakushev V S Collett T S Gas hydrates in Arctic regions Risk to drilling and production [C] M Proceedings of 2nd International Offshore and Polar Engineering Conference San Francisco, California, 1992 6692673
- [25] Yakushev V S, Chuvilin E M. Natural gas and gas hydrate accumulations within permafrost in Russia [J]. Cold Regions Science and Technology, 2000, 31: 1892197.
- [26] Collett T S Detection and evaluation of natural gas hydrates from well logs Prudhoe Bay, Alaska [C] M Proceedings of the Fourth International Conference on Permafrost Fairbanks, Alaska Washington DC: National Academy of Sciences 1983: 1692174
- [27] Yakushev V S, Perlova E V, Makhonina N A. Metastable (relaxing) gas hydrates Spreading resources prospects of development [J]. Earth's Cryosphere, 2005, 9(1): 68272
- [28] Chen Zuoyi Yang Xiaoxi Ye Guoxing et al Current progress in the research on natural gas hydrate [J]. Marine Sciences Bulletin, 2002, 21(2): 78285. [陈作义, 杨晓西, 叶国兴, 等. 天然气水合物概况及最新研究进展 [J]. 海洋通报, 2002, 21(2): 782 85.]
- [29] MacDonald G T. The future of methane as an energy resource [J]. Annual Review of Energy, 1990, 15 53283
- [30] Collett T S Energy resource potential of natural gas hydrates [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11): 1 97121 992.
- [31] Smith S L, Judge A S Estimates of methane hydrate volumes in the Beaufort Mackenzie region Northwest Territories [C] M Current Research 19952B Geological Survey of Canada, 1995: 812 88.
- [32] 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: 65289
- [33] Xu Xuezu, Cheng Guodong, Yu Qihao Gas hydrates in permafrost regions on the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Advances in Earth Science, 1999, 14(2): 2012204 [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): 2012204]
- [34] Zhang Lixin, Xu Xuezu, Ma Wei Permafrost in Qinghai-Xizang plateau and natural gas hydrate [J]. Natural Gas Geoscience, 2001, 12(1): 22226 [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): 222 26.]
- [35] Huang Peng Pan Guizang Wang Liqian, et al Prospect evaluation

- tion of natural gas hydrate resources on the Qinghai-Tibet plateau [J]. Geological Bulletin of China, 2002, 21(11): 7942798. [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): 7942798.]
- [36] Liu Huaishan, Han Xiaoli. Geophysical recognition and prediction of natural gas hydrates in Qiangtang basin of Tibet [J]. Northwest Geology, 2004, 37(4): 33238. [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): 33238.]
- [37] Chen Duofu, Wang Maochun, Xia Bin. Formation condition and distribution prediction of gas hydrate in Qinghai-Tibet Plateau permafrost [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(1): 1652172. [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): 1652172.]
- [38] Wu Qingbai, Jiang Guanli, Pu Yibing et al. Analysis of relationships between permafrost and natural gas hydrate in Qinghai-Xizang Plateau [J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(1): 29233. [吴青柏, 蒋观利, 蒲毅彬, 等. 青藏高原天然气水合物形成与多年冻土关系分析 [J]. 地质通报, 2006, 25(1): 29233.]
- [39] Bily C, Dick JW L. Natural occurring gas hydrates in the Mackenzie Delta Northwest Territories [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1974, 22(3): 3402352.
- [40] Hawkins T J, Hatelid W G. The regional setting of the Taglu Field [C]. In: Canada's Continental Margins and Offshore Petroleum Exploration. Canadian Society of Petroleum Geologists Press, 1975: 6332647.
- [41] Collett T S, Dallimore S R. Hydrocarbon gases associated with permafrost in the Mackenzie Delta Northwest Territories, Canada [J]. Applied Geochemistry, 1999, 14: 6072620.
- [42] Dallimore S R, Collett T S. Summary and implications of the Mallik 2002 Gas Hydrate Production Research Well Program [C]. In: MDallimore 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: 1236.
- [43] Satoh T, Dallimore S R, Collett T S et al. Production test plan and monitoring for the JAPEx/NOC/GSC Mallik 5L238 gas hydrate production research well [C]. In: MDallimore 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.
- [44] Collett T S. Natural gas hydrates of the Prudhoe Bay and Kupuk River area, North Slope, Alaska [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1993, 77(5): 7932812.
- [45] Timothy S Collett. North Slope of Alaska Gas Hydrate Test Well Program [EB/OL]. <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/97/97ng/ng97pdf/NGP13.PDF>, 1997.
- [46] Collett T S. Gas Hydrates in American House Committee on Energy Technology [EB/OL]. <http://resourcescommittee.house.gov/archives/108/testimony/2004/timothycollett.htm>, 2004.
- [47] Yakushev V. Intrapermafrost gas hydrates at the north of west Siberia [C]. In: MAAPG Hedberg Conference Gas Hydrates Energy Resource Potential and Associated Geologic Hazard. Vancouver BC, Canada, 2004.
- [48] Makogon Y F. Natural gas hydrates [C]. In: The State of Study in the USSR and Perspectives for Its Use. Paper Presented at the Third Chemical Congress of North America, Toronto, Canada, 1988.
- [49] Collett T S, Ginsburg G D. Gas hydrates in the Messoyakha gas field of the West Siberian Basin: a reexamination of the geologic evidence [J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 1998, 8(1): 22229.
- [50] Shine K P, Derwent R G, Wuebbles D J et al. Climate change [C]. In: MHoughton J T, Jenkins G J, Ephraums J J. The IPCC Scientific Assessment. New York: Cambridge University Press, 1990: 41268.
- [51] Lachenbruch A H, Marshall B V. Changing climate: Geothermal evidence from permafrost in the Alaskan Arctic [J]. Science, 1986, 234: 6892696.
- [52] Zhang T, Osterkamp T E, Stannes K. Effects of climate on the active layer and permafrost on the north slope of Alaska, USA [J]. Permafrost Periglacial Processes, 1997, 8: 45267.
- [53] Smith S L, Burgess M M, Rieborough D, et al. Recent trends from Canadian permafrost thermal monitoring network sites [J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2005, 16: 19230.
- [54] Pavlov A V. Permafrost climate monitoring of Russia: Analysis of field data and forecast [J]. Polar Geography, 1996, 20(1): 44264.
- [55] Cheng Guodong, Wu Tonghua. Responses of permafrost to climate change and their environmental significance, Qinghai-Tibet Plateau [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112: F02S03, doi: 10.1029/2006JF000631.
- [56] Wu Qingbai, Liu Yongzhi. Ground temperature monitoring and its recent change in Qinghai-Tibet Plateau [J]. Cold Regions Science and Technology, 2004, 38: 85292.
- [57] Kats M E, Pak D K, Dickens G R. The source and fate of massive carbon input during the latest Paleocene thermal maximum [J]. Science, 1999, 286(5444): 153121533.
- [58] Jahren A H, Aarnes N C, Samnien G. Terrestrial record of methane hydrate dissociation in the early Cretaceous [J]. Geology, 2001, 29(2): 1592162.
- [59] Padden M, Weissert H, de Rafelis M. Evidence for Late Jurassic release of methane from gas hydrate [J]. Geology, 2000, 29(3): 2232226.
- [60] Hessebo S P, Grotcke D R, Jenkens H C, et al. Massive dissociation of gas hydrate during a Jurassic oceanic anoxic event [J]. Nature, 2000, 406: 3922395.
- [61] MacDonald G J. Role of methane clathrates in past and future climates [J]. Climatic Change, 1990, 16(2): 2472281.
- [62] Nisbet E G. The end of the ice age [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1990, 27(1): 1482157.
- [63] Paull C K, Ussler III W, Dillon W P. Is the extent of glaciation limited by marine gas hydrates? [J]. Geophysics Research Letters,

1991, 18(4): 4322434

Research Summ ar iza tion on Natu ral Gas Hydrate in Perma frost Re gion s

WU Qingba j CHENG Guodong

(State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000, China)

Abstract Because of the latent energy prospect and its impacts on the climate and the environment, many countries began the studies on natural gas hydrate in permafrost regions and achieved great research progresses subsequently. The relations between natural gas hydrate and permafrost, the reserves of natural gas hydrate in permafrost regions and the present research situations of natural gas hydrate in representative permafrost regions are explained in this paper. The results indicated that the formation conditions of natural gas hydrate such as temperature and pressure were restricted by permafrost and the natural gas hydrate with self-preservation was discovered inside the permafrost layer. The accumulation and transfer of free gas in sediment were influenced by permafrost. Besides, the thawing of permafrost could raise the pore pressure. The present estimations of the natural gas hydrate reserves in permafrost regions were not integral or all-around, which were only made in some representative permafrost regions. The estimation showed that the natural gas hydrate reserves in North slope in Alaska, US were about $1.0 \times 10^{12} \sim 1.2 \times 10^{12} \text{ m}^3$, about $1.6 \times 10^{13} \text{ m}^3$ in Beaufort-Mackenzie Delta, and about $1.7 \times 10^{13} \text{ m}^3$ above 250 m depth in west Siberia. The existence of natural gas hydrate in Qinghai-Tibetan Plateau is an important issue which demands prompt understanding.

Key words Gas hydrates Permafrost Qinghai-Tibet plateau

5地球科学进展 6杂志广告参考价目表

黑白 (文字、照片)		彩色 (文字、照片)	
封二、封三	价格 (元)	封二、封三	价格 (元)
纯文字	1500~ 2000	纯文字	3500~ 4000
文字加照片	2500~ 3000	文字加照片	4500~ 5000
封四 (含文字、照片)	2000~ 2500	封四 (含文字、照片)	5000~ 6000
1/2版面	价格减半	1/2版面	2500~ 3000
1/3版面	价格的 1/3	1/3版面	1500~ 2000
1/4版面	价格的 1/4	1/4版面	1000~ 1500
插页 (正反两版)	3000~ 4000	插页 (正反两版)	6000~ 8000
注: (1)客户如果长期合作,可以给予 1% ~ 20% 的优惠 (需签定合作意向)。 (2)本刊与客户之间可根据广告的难易程度协商确定价格。 (3)其他相关事项可协商确定。 (4)1/2、1/3、1/4版面的纯文字宣传,只做插页广告。 联系电话: 0931- 4968256 E-mail: adearth@lzb.ac.cn			