

加拿大气水合物的分布与储量

摘要 经过对北部马更些三角洲—博富特海、北极爱琴海北边的戴维斯海峡、拉不拉多陆架、斯科汀陆架、沿加拿大大西洋边缘的纽芬兰葛朗兹岸滩以及太平洋边缘广阔的大陆架区域和北极永久冻土带气水合物潜势的各种数据分析计算得到：加拿大气水合物的储量总计为 $10^{10} \sim 10^{12} \text{ m}^3$ (保守估算)，所赋存的甲烷为 $10^{12} \sim 10^{14} \text{ m}^3$ 。与加拿大常规油气远景储量(约为 $0.27 \times 10^{14} \text{ m}^3$)相比，水合物气总量要高出2倍多，因此如果该水合物能开发并且甲烷能从水合物中分离出来，就意味着未来北美地区能源供给就会得到保证。

关键词 加拿大 气水合物 分布 储量

1 引言

在加拿大马更些三角洲—博富特海、大西洋边缘、北极的一些岛屿等多处存在水合物(图1)。在马更些三角洲地区的 Mallik 2L—38 探井中采集到了一部分水合物样品，大多数见于地下 200 m 至推测的水合物稳定带最大深度之间。地球物理测井数据推测，在大西洋边缘，尤其是拉不拉多陆架和纽芬兰葛朗兹岸滩东北都存在气水合物。在太平洋边缘范卡沃岛近海通过 BSRs 研究也发现存在气水合物。

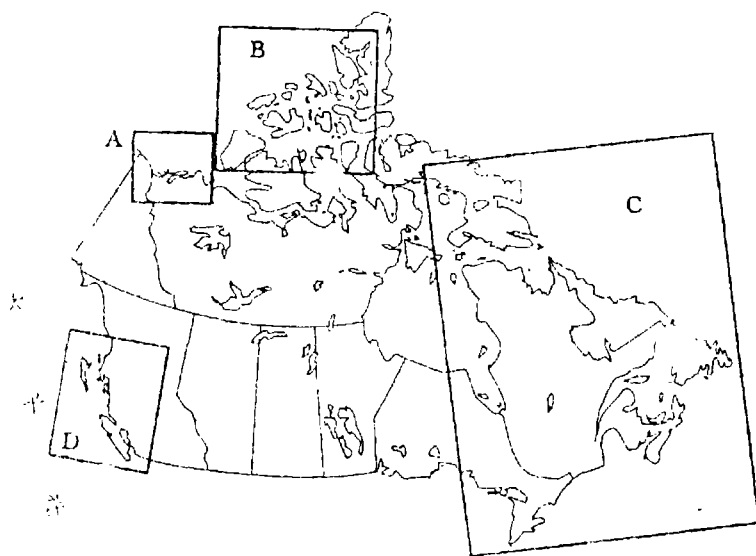


图1 研究区位置分布图

(A)马更些三角洲—博富特海；(B)北极爱琴海；(C)大西洋边缘；(D)太平洋边缘

运用地球物理测井记录解释水合物时很难区分游离气带和水合物带。用传统的地球物

理电缆响应方法区分常规油气与水合物的存在是很重要的方法,如通过对校正之后的温度数据和热传导性结构分析,几处原先被认为是水合物存在的区域可能是常规气聚集区。在许多情况下,水合物被认为是在 400~1 100 m 的深度出现。低于甲烷水合物稳定带极限深度的测井记录是根据温压数据来推定的。游离气、水合物和冰的地球物理特征比较相似,为确定水合物稳定带而对地球物理数据进行校正是必然的。Majorowicz 和 Hannigan(2000)对马更些三角洲—博富特海近 200 个测井的地球物理记录重新作了评价,结果表明原来水合物存在的地区实际只是水合物稳定带底部游离气体的聚集区。气水合物中的重烃来自于甲烷水合物稳定带下部,这些复杂的气体成分曾被用来解释地球物理数据显示的气水合物开始出现区至稳定带基底之间的差异。然而在博富特海西部,从 11 口测井的气体地球化学特征中得到水合物以 I 型结构为主,起初认为是水合物的地区(位于预测的 I 型结构水合物稳定带深度之下)现在解释为游离气带。目前水合物稳定带基本上用单井物理数据,如果考虑多个测井探知的水合物区之间的相关关系必定得到更多更加连贯的解释。影响评估的因素主要为地球物理参数解释的不确定性和难度,另外数据、研究程度等的差别也有影响。储量计算主要依赖测井数据。由于马更些三角洲—博富特海和爱琴海测井多,永久冻土区研究程度较高,水合物及其稳定带最好鉴别。相对于加拿大周边其它地区,如大西洋和太平洋边缘,测井少、密度小。信息缺乏使得这两个地区水合物储量的估算既困难又不太确定。因此只给出推测的水合物及其中甲烷体积的储量范围。

2 气水合物的探测和厚度确定

在加拿大的沉积盆地中直接指示水合物存在的证据不多。在马更些三角洲,研究探井是获取水合物存在直接的、最有意义证据的手段,在其它地区则通过测井数据和地震记录来确定和推测水合物存在与否。因此,水合物远景评价最重要的基础不是直接证据。

测井中泥浆汽化作用提供了确定水合物中气体的方法,地球物理测井是另外一个探测水合物的方法。由于永久冻土地带水合物和冰的电阻率特征相似,地球物理测井在冻土带下部和深海背景条件下最为有效。双感应侧向测井和声波测井主要用于井中水合物的探测,感应测井的高电阻率和声波记录的高速度是水合物承载区反应的首要特征。在马更些三角洲—博富特海、爱琴海和大西洋边缘,通过 1 500 m 以上钻井的地球物理数据的解释来推测水合物,在大西洋边缘戴维斯海峡、拉不拉多陆架、斯可汀陆架和纽芬兰葛朗兹岸滩通过测井来确定水合物是否存在。

马更些三角洲大约 200 个井的 29% 有水合物,马更些三角洲—博富特海近海 45% (沿岸仅为 14%) 的测井被怀疑含水合物。爱琴海 Sverdrup 盆地 168 口井的 52% 可能存在于水合物。大西洋的戴维斯海峡、拉不拉多和斯可汀陆架、纽芬兰葛朗兹岸滩 480 口井中 26 口有水合物。在班玢岛沿海和格陵兰岛南部,通过 ODP 计划发现了水合物的存在证据。通过横穿北 Cascadia 大陆斜坡的 BSRs 剖面分析,证明在太平洋边缘有水合物存在。

图 2 的直方图表示马更些三角洲—博富特海、北极爱琴海和大西洋边缘已被探测到的水合物稳定带,其平均厚度分别为 82、65、79m。根据 ODP 889 钻孔点资料,在太平洋边缘水合物富集区,厚度为 110 m,水合物充填了 10%~20% 的有效孔隙。上述的水合物厚度值后来用来计算其他地方的水合物的远景储量。

3 气水合物稳定条件

气水合物的稳定性依赖于多个因素,其中温度、压力和气体的成分最为重要。大部分研究中假设了流体静水压力和表面压力条件。通常,流体静压力梯度为 9.795 kPa/m ,孔隙压力梯度比静水压力梯度大。本项研究中流体静压力梯度是假设的。这样虽然超压带深度大于推测的水合物的深度,但这并不重要,因为一些盆地在研究过程中出现超压带已经屡见不鲜。

气体的成分影响水合物的稳定性。甲烷通常形成 I 型结构水合物,甲烷中加一些乙烷或丙烷则会导致 II 型结构水合物的形成。水合物结构对温度和压力也很敏感。有 CO_2 加入,水合物的分解温度升高。相反,孔隙水盐度增加,分解温度降低。加拿大沉积盆地的数据表明,水合物中甲烷占绝对优势。马更些三角洲—博富特海油井中的气体样品、泥浆测井和气相色谱数据显示,在 1500 m 以上深度的气体中几乎全为甲烷气体。Weaver and Stewart (1992) 曾报道过气体组成中 99.5% 为甲烷。Bily 和 Dike (1974) 报道马更些三角洲理查兹岛的两个钻井气体样品中甲烷的含量为 $99.19\% \sim 99.53\%$ 。另外对马更些三角洲—博富特海钻井 2000 m 以上的分段取样气体的组成进行分析后发现, Kigavik A-43 井、Adgo J-27 井、Niglintgak H-30 和 Kumak E-58 井气体工业分析中甲烷占据绝对优势,另有极少量乙烷、丙烷和丁烷气体。阿拉斯加北部斜坡水合物区样品测试结果发现,甲烷的含量为 93% ,氮为 7% 。由此推测,在 I 型结构水合物中甲烷居多,其它结构的水合物中则有所不同。出现乙烷或更重的气水合物的情况我们会强调它的稳定带形成的温度比甲烷水合物的形成温度低,如含甲烷 96.5% 、乙烷 3.5% 的水合物稳定带基底比甲烷水合物稳定带基底低 300 m 。因此,假设全部为甲烷水合物会造成对水合物储量估算的结果保守,要比实际储量小。

4 沿岸水合物位置分布

环北极地区的厚层永久冻土带、沿岸或海域

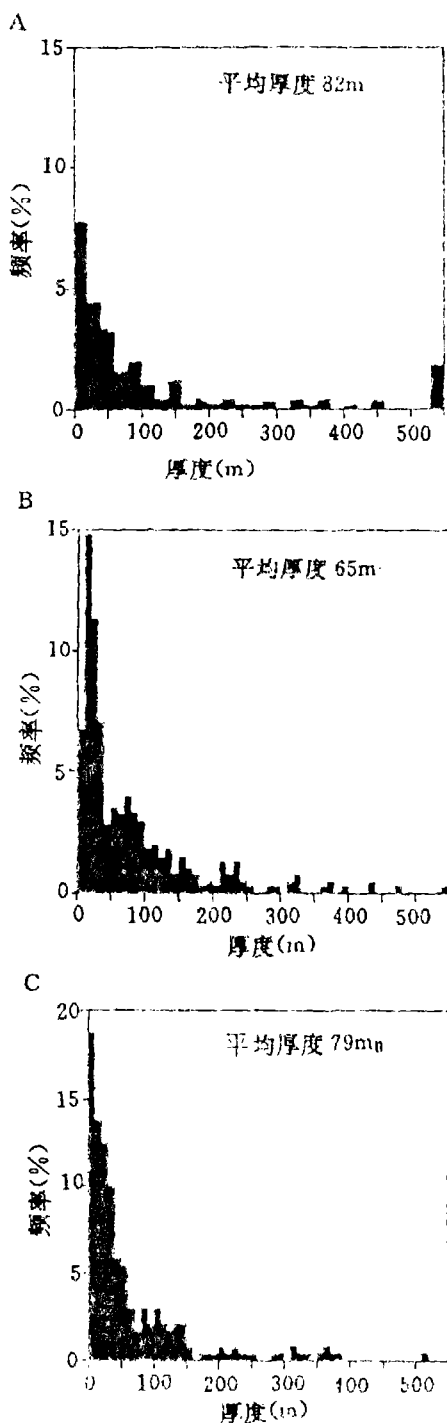


图2 据测井数据推测的气水合物稳定带厚度直方图

(A) 马更些三角洲—博富特海; (B) 北冰爱琴海; (C) 大西洋边缘; (D) 大西洋边缘

均可形成水合物。北极爱琴海和马更些三角洲—博富特海永久冻土发育,厚度通常大于200 m,地热梯度(<30 mK/m)条件优越,易于水合物的形成。在马更些三角洲,地热梯度平常小于30 mK/m,最低20 mK/m,永久冻土层厚度大,低温达到 -1°C 。根据8000年前海岛的出现和地表温度的降低得知,爱琴海海滩环境已经由海洋变成了陆地。环境的变迁影响到永久冻土和水合物的形成。整个地区地热梯度变化范围极大($15\sim 45^{\circ}\text{C}/\text{km}$)。新海岛的出现或部分出现利于水合物的形成。现今暴露于地表的大部分地区的地表温度在 $-15\sim 20^{\circ}\text{C}$ 之间,这样可产生不利于水合物生成的低压环境,然而低温可确保向上迁移的气体被水合物笼形结构“捕获”,如Melville岛。图3显示该岛的水合物稳定带底部深度小于 $1\,800\pm 100$ m。从地球物理测井和钻杆测试分析得到的单井井底温度剖面的不确定性导致了深度估计的不确定性,另外热传导剖面的不确定性产生了不同的P-H模式。

5 海洋环境

由于静力学海水压力、海底温度及地热梯度低,海上沉积物储层中可存在水合物。在海底以下300 m或大于300 m的地方,当气体向上迁移时会被“捕获”形成水合物(图4、5)。海底的水合物在沉积物中的厚度主要依赖地热梯度和水深。如图5所示,当地热梯度为 $45\sim 25$ mK/m时,天然气水合物稳定带的厚度随海水深度($1\,300\sim 1\,600$ m)的变化在300~600 m之间。太平洋边缘地区可望存在相对较低的(40 mK/m)地热梯度。北极相对于邻区(30 mK/m)而言,地热梯度低的特点更加典型。大西洋边缘平均地热梯度大约为32 mK/m,爱琴海岛间海峡的地热梯度为 $45\sim 25$ mK/m,博富特近海海底永久冻土厚度达900 m,加之水压可保证高压和低温条件(图4、5),近海地热梯度为 $25\sim 40$ mK/m。

水深是影响水合物稳定带厚度的重要因子,水合物稳定带厚度随着水深的增加而增加(图5)。在具体水深的条件下,水合物稳定带的潜在厚度也受到地热梯度和温度的影响。地热梯度稳定地区的水合物稳定带的厚度依赖于水深和温度。由此可见,只有较低海底温度(相对于其他具有相同水压和地热梯度的地区)的北冰洋水合物稳定带的厚度较小,开放式海洋环境与北极岛间水道的温度(海底只有 -1°C)差为 4°C 。然而海洋环境中海底温度达 3°C ,这就使得水合物稳定带的厚度和水合物出现的地区底部的厚度变的很有意义。

6 加拿大潜在水合物稳定带的面积

由于研究的四个“地质省”面积大,数据点少,使得在计算水合物稳定带的面积和厚度,和把估算数据转换为直接或间接指示水合物存在证据时限定了水合物储量的估算。对海上和永久冻土地带的水合物稳定带面积、厚度的计算主要基于以下四点:① 假设水合物全

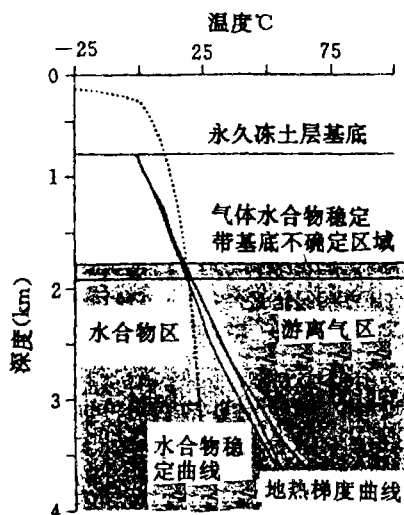


图3 加拿大西北边境 Melville 岛 Sverdrup 盆地中测井所示水合物稳定带深度区间确定实例

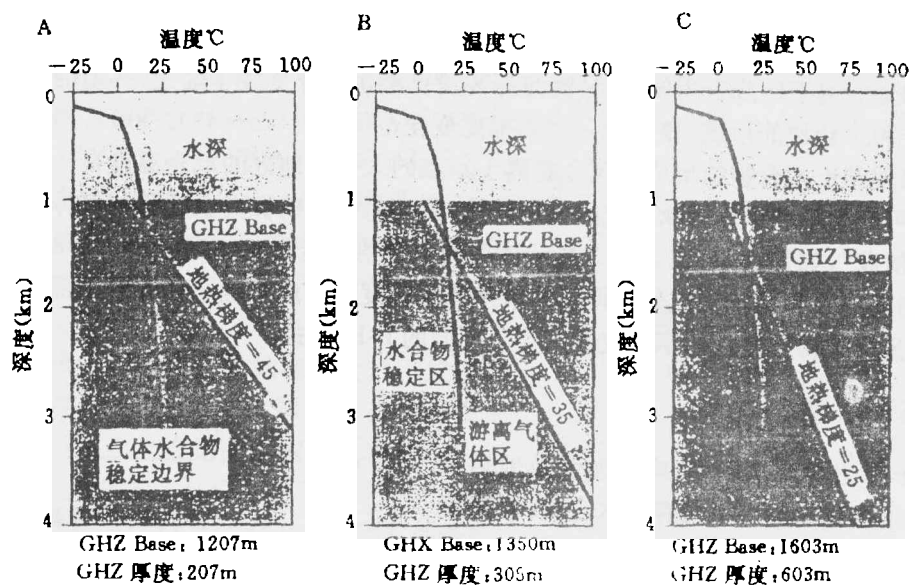


图4 水合物稳定带基底深度的计算

GHZ: 气水合物稳定带; GHZ Base: 气水合物稳定带基底

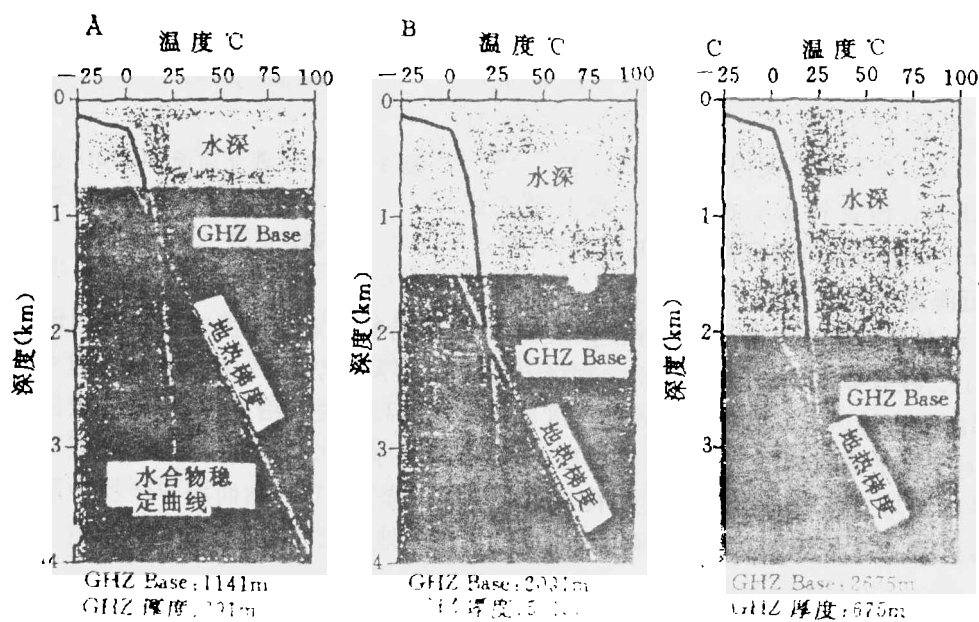


图5 在 30 mK/m 的地温梯度范围内潜在水合物稳定带厚度

GHZ: 气水合物稳定带; GHZ Base: 气水合物稳定带基底

部为 I 型结构水合物;② 海底和永久冻土底部的低温条件;③ 对地热梯度田的分析;④ 流体静水压力剖面。

马更些三角洲—博富特海水合物稳定带面积估计可达 $125\,000\text{ km}^2$ (图 6), 厚度为 $200\sim 1\,400\text{ m}$ 。I 型结构气水合物稳定带面积作为深度和位置的函数变化非常大, 海底温度升高, 深度大于 $1\,000\text{ m}$ 时水合物稳定带的规模大大减少 (图 6)。永久冻土区水合物厚度为 $0\sim 900\text{ m}$, 并依赖于地热梯度和压力存在。整个地区, 可靠数据显示平均水合物厚度大约 82 m (图 2A)。北极爱琴海地区水合物出现于沿岸 (I 型结构水合物) 和近岸很深的岛间海峡区域。低温、厚层永久冻土、适宜的地热梯度 ($25\sim 35\text{ mK/m}$) 可形成厚度为 $200\sim 2\,000\text{ m}$ 的水合物稳定带。在沿岸永久冻土层底部, 大多数推测的 I 型结构水合物稳定带的厚度为 $200\sim 2\,000\text{ m}$ 。深水岛间海峡, 由于海底低温, 适宜的地热梯度 ($25\sim 35\text{ mK/m}$)、高压条件, 形成的水合物稳定带厚度小于 $1\,200\text{ m}$ 。在海岛与深水岛间海峡的狭窄地区, 由于压力减少并伴随后期冰河海的出现, 为不发育水合物稳定带或不稳定的水合物稳定带。爱琴海总的水合物稳定带面积为 $770\,000\text{ km}^2$, 平均厚度 65 m 。大西洋边缘和近岸区, 适合于水合物存在的环境出现在水深为 $300\sim 2\,000\text{ m}$ 的陆架区域。这里地热梯度约 30 mK/m , 海底温度 $-1.8\sim 3^\circ\text{C}$, 水压高, 存在大面积的潜在水合物稳定带, 推测甲烷水合物稳定带的面积为 $400\,000\text{ km}^2$, 平均厚度约 79 m (图 2C)。太平洋边缘地热梯度相对于大西洋稍微较高 (约 $35\sim 40\text{ mK/m}$)。较高的地热梯度和平常较浅的水深把水合物稳定带存在的范围限定在很狭小的区域内。推测太平洋近岸水合物稳定带的面积约 $30\,000\text{ km}^2$, 水合物充填率为 $10\%\sim 35\%$ 的稳定带平均厚度约 110 m 。

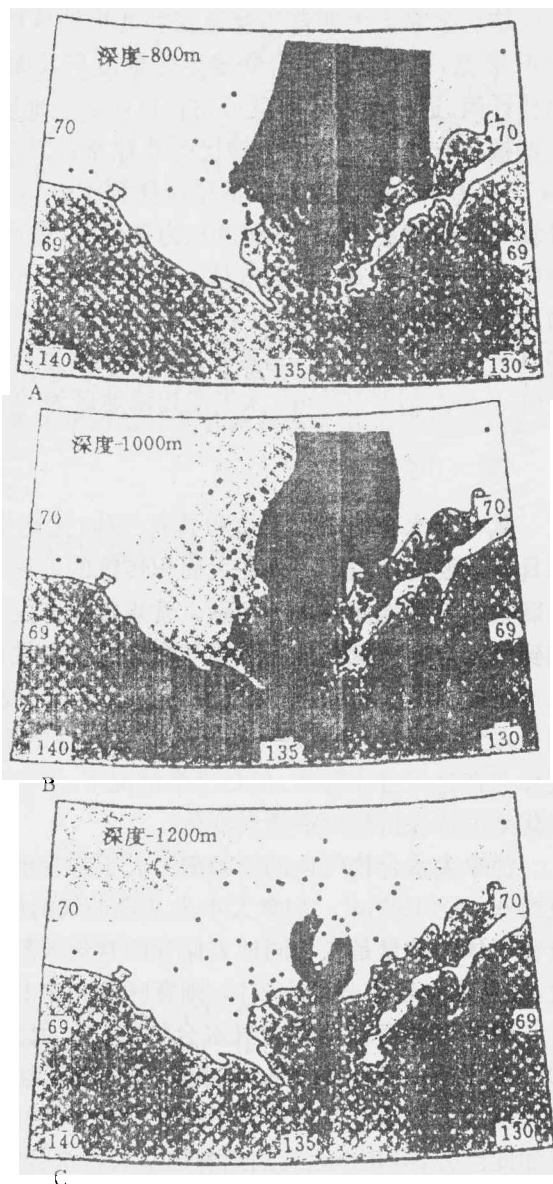


图 6 马更些三角洲—博富特海甲烷水合物稳定带区域
深度: (A)— 800 m ; (B)— $1\,000\text{ m}$; (C)— $1\,200\text{ m}$

7 水合物和甲烷气的储量估算

结合加拿大大西洋边缘地区和北极地区的测井数据、太平洋边缘地区的 BSRs 分析和 ODP 数据,可估算到水合物稳定带厚度与其面积,进而得到了四个地区初步的水合物储量的估计值。通过面积 \times 厚度可估算目前适宜地质条件下仅被水合物充填的部分储层的体积,根据被水合物部分充填的储层的孔隙率计算当前水合物的体积(水合物的饱和度 $=1.0-S_w$, S_w 为水的饱和度),根据单位体积水合物分解释放约 160 倍体积的气体的比例关系再计算气体的储量。在标准温度压力条件下,笼形结构中气体的充填率为 90%,单位体积水合物中大概包含了 164 倍的气体。若以 139~164 倍体积计算,我们估计加拿大水合物中潜在的天然气总量的范围在 $(0.44\sim8.1)\times10^{14}\text{ m}^3$ 之间。它们各自储量和分布如下:爱琴海为 $(0.19\sim6.2)\times10^{14}\text{ m}^3$,马更些三角洲—博富特海为 $(0.24\sim8.7)\times10^{13}\text{ m}^3$,大西洋边缘地区为 $(1.9\sim7.8)\times10^{13}\text{ m}^3$,太平洋边缘地区为 $(0.32\sim2.4)\times10^{13}\text{ m}^3$ 。

8 讨 论

赋存于水合物中的甲烷和其它气体,无论作为能源或者作为自然温室气体的潜在来源都具有重要的作用。另外在大面积传统的近海和沿岸石油开发地区出现如此巨大的水合物无疑会牵涉到地质技术的问题。常规资源开发和环境变化所带来的水合物的不稳定性能影响到气水合物所赋存的沉积物与海底的稳定性,而后两者又会影响石油和深海钻探。不过,无论过去、现在、将来,全球气温的变化对水合物的影响不大,原因之一是永久冻土区热的热惯量;之二是位于深水底下的水合物稳定性的不断增加。北极海岸地区对此变化最为敏感,气体会在这里首先释放。但是通常情况下,在百万年尺度上多数加拿大水合物聚集区对气候变化来说将保持稳定或缓慢变化。

加拿大水合物气体的资源潜力大于常规油气资源。目前加拿大本土常规油气资源估计值约 $0.27\times10^{14}\text{ m}^3$ 。加拿大本土常规油气的潜在储量大概是当前每年产量的 150 倍,而水合物气体的储量是在相同地方储存的常规天然气资源的 1.6~30 倍。假如能够对水合物开发,能从水合物中分离出气体,则意味着未来北美地区的能源供给能得到保证。

现在全球海洋范围内气水合物的估计值为 $10^{15}\sim10^{18}\text{ m}^3$,大陆范围内估计值为 $10^{13}\sim10^{16}\text{ m}^3$ 。Kvenvolden(1988)认为全球估计值为 10^{16} m^3 。这一估计值相当于大约 10^4 Gt 的碳,大大超过了地球上其它资源中的碳(如大气层中的碳仅为约 3.6 Gt)。水合物中甲烷储量虽然如此巨大,但几个因素制约着加拿大将水合物作为能源供给而进行开发。近海区水合物的能量密度相当低,技术上也难于对其进行开发。加拿大永久冻土地区底部的一些沉积盆地中气水合物与常规油气构造共生,如 Mallik 井,水合物气总量估计达 $1.1\times10^{11}\text{ m}^3$ (约相当于拿大油气总量的 0.4% 和每年产量的 60%)。然而,由于技术的挑战和生产费用的原因,现在研究的成果只能为将来商业上可行性开采提供知识,生产性开发或许要等到 2015 年。在加拿大西部沉积盆地煤层气对水合物有很强的竞争力。但水合物的开发将直接和常规游离气的生产有关,在边境地区常规气运输基础设施的建立可望早于水合物的开发时间。

加拿大水合物中的甲烷资源应该得到更进一步研究,尤其因为地质上水合物与常规资源一起共生可以成为另外一个目的。开发常规资源的决定将极大改善水合物资源的经济性。俄罗斯麦索亚哈气田的开发历史表明可以从水合物中生产出气体,特别是在同时存在水合

物和常规油气的储层中。从水合物稳定带底部的常规油气储层中进行水合物的生产具有很大的潜力,而且伴随常规气体生产,储层压力降低,气水合物会更不稳定。这一过程反过来可使常规油气储层从水合物的分解中得到补充。气水合物上覆于甚至圈闭于常规气田之上的现象极为常见,马更些三角洲—博富特的多个地方具有类似的情况。该区和北极许多岛屿出现气水合物与常规油气共生的现象。然而大多数常规油气的赋存深度要大于气水合物的深度,未来常规油气的开发可能会影响到其上水合物的稳定性。在这样的地区需要对二者之间关系进行详细研究。

9 结 论

在未采用单一和相似方法得出单一数据的情况下给出的水合物及甲烷的储量只能是一个大概的范围。对考虑到的所有加拿大周边地区气水合物总储量和气体潜力来说,评估方法是可比评估。对水合物和水合物气资源量的最保守的估计是其比加拿大本土总的常规油气资源的储量还要大。

吴保祥 据 AAPG Bulletin, 2001, 85: 1211~1230 编译, 雷怀彦 校。

(上接第 31 页)

- 26 李小地. 中国深部油气藏的形成与分布初探. 石油勘探与开发, 1994, 21(1): 34~39.
- 27 李琳等. 辽河盆地西部凹陷深层石油地质综合评价. 石油学报, 1999, 20(5): 10~15.
- 28 妥进才等. 渤海湾盆地深层油气资源前景分析. 天然气地球科学, 1999, 10(6): 28~31.
- 29 周世新等. 深层油气地球化学研究新进展. 天然气地球科学, 1999, 10(6): 10~15.
- 30 李景坤等. 松辽盆地北部深层气源对比. 大庆石油地质与开发, 1999, 18(1): 5~7.
- 31 孟自芳、刘文汇等. 中国西北深层气研究. 2000, 内部资料.
- 32 K. E. 维谢鲍夫, 马爱山译. 结晶基岩深部的含油气性. 石油地质信息, 1995, 16(1): 5~13.
- 33 O. A. 什尼普, 任俞译. 含油气区内基岩储层的形成. 石油地质信息, 1996, 17(3): 144~145.
- 34 B. C. 沃里沃夫斯基, 任俞译. 陆壳烃类非生物成因的新论点. 1995, 16(1): 10~13.
- 35 吉江照一, 陈春译. 地球深层天然气. 天然气地球科学, 2001, 12(4-5): 76~81.