

最新国际天然气水合物研究现状及资源潜力评估(下)*

许红^{1,2} 黄君权³ 夏斌¹ 蔡乾忠¹

(1.中国科学院广州地球化学研究所 2.国土资源部青岛海洋地质研究所 3.天然气工业杂志社)

许红等.最新国际天然气水合物研究现状及资源潜力评估(下).天然气工业,2005;25(6):18~23

摘要 文章阐述了天然气水合物的概念与基本特征,分析国内外最新研究动态和深海调查成果后认为,迄今为止全球天然气水合物含甲烷资源的定量评估可以分为1980年以前的“推测性”阶段,1980年至1995年的“底限值”阶段和1995年以来的“确定性”阶段。目前,中国天然气水合物调查研究面临的重大难题是深海原位天然气水合物实物样品的保真采集,而技术瓶颈是深海天然气水合物保压保温取心钻具的研制和调查者对配套高技术调查船舶的拥有及航次的科学调配。

主题词 天然气 水合物 研究 进展 资源 潜力 评价

(上接本刊2005年第5期第21页)

三、各国主要工作进展^①

目前,有30多个国家与地区开展了天然气水合物调查研究。已在全球116个地区发现了天然气水合物存在标志或实物样品。其中,陆地38处(永久冻土带),海洋78处。这些发现多数体现了海洋高技术,包括高分辨率地震资料的采集、处理和解释以获取地震BSR标志,ODP—DSDP航次实施钻探和样品采集,深海底定位与实时摄像等的成果。其中有23处取得了实物样品(包括钻井取样15处和重力活塞取样8处);测井曲线解释8处。

1. 美国天然气水合物资源评估

目前,美国在天然气水合物研究方面处于领先地位。1995年,ODP164航次在美国布莱克海台钻探完成4个站位,验证了地震剖面上从无BSR反射(994站位)到中等强度BSR反射(995站位)和很强BSR反射(997站位)现象(见上期本文图1和本期彩色图版1)与天然气水合物赋存状况的关系。结果在无BSR反射的994站位259 m、261 m获得小结核状和小块状天然气水合物实物样品;在BSR反射很强的997站位331 m处获得5 cm、7 cm、15 cm和

大于30 cm块状天然气水合物实物样品;但在995站位没有获得样品。估算994~997站位天然气水合物含甲烷资源量为 $33.88 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。在该航次996站位2.6~63 m的地层浅部获得长度5~8 cm块状实物样品。由此证实和推断形成以下重要认识。

(1)确认无BSR反射的994站位天然气水合物的含量并不少于995—997站位,解释为该站位天然气水合物稳定带之下没有足够的甲烷气体来立即饱和孔隙水。

(2)在海底最浅部的几十厘米深处具有几个明显的天然气水合物层,在海底以下25 cm深度内天然气水合物占沉积物体积的10%~30%;在海底以下200~450 m(BSR位置),天然气水合物占沉积物体积的1%~14%。在995和997站位海底以下190~600 m之间,发现保压保温取心器内岩心含气体平均值为每立方米孔隙空间0.55 mol甲烷。

(3)布莱克海台含天然气水合物沉积物为中新世到更新世的灰绿色含有孔虫和富含钙质超微化石软泥,沉积速率高达5.9~26 cm/ka。

(4)995—997站位的BSR均与其下伏所含游离气有关,采获天然气水合物样品的深度均远在BSR之上;BSR反射上下层位的岩性、孔隙度、岩石密度、

* 本文由:国土资源大调查项目(20001100022033);天然气水合物国家专项;中国科学院知识创新工程项目(KZCX 2—SW—117),中国科学院广州地球化学研究所与南海海洋研究所边缘海地质重点实验室基金项目,“九五”国家专项(126—03—13—02)联合资助。

作者简介:许红,详见本刊2005年第5期第21页。地址:(266071)山东省青岛市福州路62号海洋地质研究所。电话:(0532)5755836。E-mail:hongxu@qingdao.cngb.com

水的含量等均无变化。

(5)ODP164 航次 997 站位在 200~450 m 发现 Cl^- 含量呈较大分布异常, CH_4 与 CO_2 碳同位素之间存在同步消长关系。

(6)ODP164 航次 996 站位位于布莱克海台一底辟(Black Ridge Diapir)顶部和断层附近,具有 BSR 反射异常,通过海底摄像在断裂顶部发现了上涌的甲烷气柱和与甲烷溢气口相关的生物群落;在孔深 2.6~63 m 浅层取到脉状、结核状和 5~8 cm 块状水合物样品。

1995 年,根据 ODP164 航次钻井取样的成果,美国地质调查局完成了全美天然气水合物资源的评估。该次评估的焦点,是力图以国家评估报告形式证明储存在美国近海和海外地区原地天然气水合物中的天然气体积,提出控制天然气水合物存在的地质参数,评价美国天然气水合物与全美已经发现与尚未发现的常规—非常规烃类的资源。

该次评价将有关地质背景与烃类聚集潜力的作用分类,将作用于烃类聚集地质作用的因素模式化,提出烃类生成与聚集模式的主要地质属性概率,量化了烃类聚集的必要地质因素。获得全美适宜位置内(含海底与阿拉斯加永冻层)天然气水合物甲烷资源 $(320\sim 19000)\times 10^{12}\text{ m}^3$, 中间值 $9\times 10^{15}\text{ m}^3$ (Collett, 1995), 下限值 $6\times 10^{15}\text{ m}^3$ (Collett, 1997), 表明全美天然气水合物的巨大资源潜力。其中,专门核算了布莱克海台一个 3000 km^2 面积的区块(体积 $1.13\times 10^{11}\text{ m}^3$), 含甲烷资源 $1.8\times 10^{13}\text{ m}^3$, 或 $3\times 10^{13}\text{ m}^3$ (Dickens 等, 1997)。

地震反射剖面表明布莱克海台天然气水合物和游离气带延展达 26000 km^2 , 估算时假定该面积足以代表整个布莱克海台地区含天然气水合物的情况, 则算得布莱克海台天然气水合物与游离气带含甲烷 $4.7\times 10^{10}\text{ t}$ 。倘若确认此计算结果, 则该数值大约占地球生物圈总碳含量的 7%, 按照 1996 年全美天然气的消费量折算, 将可满足美国 105 年的需要。由于 ODP164 航次的出色成果, 1997 年, 美国总统科学和技术顾问委员会在《21 世纪能源研究和开发面临的挑战》报告中明确建议能源部等诸多政府部门联合制定一个全球甲烷天然气水合物的研究计划, 资助 2 亿美元, 在 10 年期间完成天然气水合物研究开发计划。

1998 年 5 月 24 日, 美国参议院能源委员会一致通过了 1418 号议案——“天然气水合物研究与资源开发计划”。把天然气水合物资源作为国家发展的

战略能源列入长远计划, 该议案批准天然气水合物资源研究开发年投入经费 2000 万美元, 要求能源部 2015 年实施商业性开采。1999 年, 美国制定了勘探开发天然气水合物的法律条文。

2001 年, 美国完成了墨西哥湾专属经济区内天然气水合物含甲烷资源估算。该次评价区水深 500~1500 m, 面积约 70000 km^2 , 确定有两类天然气水合物矿藏: 一类为天然气水合物混合成因气藏, 标准状态下含 $(8\sim 11)\times 10^{12}\text{ m}^3$ 甲烷(C_1)~戊烷(C_5)资源量, 提出了未来进行经济钻探的目标; 另一类为天然气水合物生物成因气藏, 标准状态下含甲烷资源量 $(2\sim 3)\times 10^{12}\text{ m}^3$ 。其中, 该次评价目标达 100 多个, 分布于整个评价区, 结果获得单位面积天然气水合物含甲烷资源密度至少为过去的 15 倍 (Alexei V. Milkov and Roger Sassen, 2001)。

具有重要借鉴意义的是, 美国将天然气水合物的开发研究提高到能源、全球气候变化、海底稳定性、灾害和国家经济安全的高度, 其目的不仅仅是为了向国内提供持续不断的化石燃料和基本的安全能源保障, 确保美国国内能源稳定供应, 更为重要的是要提高美国人的生活质量, 保护生态、保护环境及其国家安全。

2. 俄罗斯天然气水合物资源评估

俄罗斯是最早发现和全方位开展天然气水合物资源调查评价的国家之一。除其领海(鄂霍茨克海、白令海、里海、北冰洋等)有巨大天然气水合物资源潜力以外, 俄罗斯还拥有全球唯一正在从天然气水合物中采掘天然气的永久冻土带气田——西西伯利亚 Messoyaha(麦索亚哈)气田, 迄今为止该气田已经半连续生产达 18 年。俄罗斯还在贝加尔湖淡水沉积物中发现天然气水合物, 在里海 1950 m 水深处发现冰状天然气水合物晶体; 确定在黑海海域海底天然气水合物矿层厚度达 6 m, 在 6~650 m 深处存在 150 多个天然气水合物矿藏, 天然气水合物含甲烷资源量 $(20\sim 25)\times 10^{13}\text{ m}^3$ 。

1994 年以来, 俄罗斯在太平洋西北部 Shatsky 洋中脊水深 2500~3400 m 的地区发现标准 BSR, 埋深 40~160 m。2000 年, N.B. Kakvov 等评价提交了俄罗斯欧洲东北部乌拉尔山以西永久冻土带地区的天然气水合物含甲烷资源量 $100\times 10^9\text{ m}^3$ (3.5 TCF)。据 Virkuta 市附近 Kosyu-Rogov 凹陷和 Korataika 洼地北部约 50 口井岩心确定 Komi Republic 永久冻土层以下有一个厚度达 150~400 m 的天然气水合物矿带, 上覆永久冻土层厚度多小于

300 m。确定其中含天然气水合物矿带形成于更新世到现代,是气候与地质条件产物;矿层温度 $1\sim 2^{\circ}\text{C}$,烃类流体源于泥盆系,沿断层或裂隙穿过二叠系运移,再逐渐被圈闭,范围达 $12\times 10^4\text{ km}^2$ 。

2002年,针对黑海边缘及中心地区天然气水合物的资源评价综合分析了沉积物深度、温度、热流、地温梯度—热导率、物理化学平衡相、不同深度有机质含量与孔隙度,稳定带内水合物含量及天然气体积膨胀系数。其中,水合物矿层水深 $620\sim 700\text{ m}$,而其深水区面积的91% (290000 km^2)是天然气水合物赋存区带;最有利远景区占整个黑海面积的35.5%,面积 100800 km^2 ,稳定带面积 $25600\sim 30000\text{ km}^2$,占整个最有利远景区面积的30%。计算时取纯天然天然气水合物约占海底沉积物 $3.0\%\sim 3.5\%$ 即 $(0.3\%\sim 0.35\%)\times 10^{12}\text{ km}^2$,乘以系数140,获黑海天然气水合物资源量 $(300\sim 350)\times 10^9\text{ m}^3$,其中含天然气 $(42\sim 49)\times 10^{12}\text{ m}^3$ (Василев,2002)。

3. 日本天然气水合物资源评估

日本历来是一个资源极度贫乏国家和能源进口消费大国。作为一个资源极度匮乏的国家,日本目前正在竭尽全力为保障能源安全近可能“多”地和尽可能“早”地求助于天然气水合物,并花大力气力求在勘探—开发方面取得突破。

1994年,日本成立了天然气水合物开发促进委员会,先后启动了“天然气水合物研究及开发推进初步计划”和“开发利用天然气水合物”国家计划。由日本通产省协调,日本地质调查局加上10家石油公司共同组织进行早期调查勘探、钻探,进行了天然气水合物相关技术研究和资源评价。其研究开发国家五年计划(1995~1999年)投入经费6400万美元,东京大学等科学家在其他项目支持下开展了深入的研究与实验工作。自1994年以来,日本地调所与东京天然气公司、大阪天然气公司、日本石油勘探公司合作开展天然气水合物基础研究,早期的一些研究成果在1998年的地质调查所月报有集中发表。1997~1999年,通产省下属的新能源技术综合开发机构(NEDO)设立了以研究为主旨的项目——天然水合物资源化技术先导研究开发,这些成果基本上没有发表。迄今为止,日本在其西南海海槽与东南海海槽两个地区积累了丰富的地球物理资料,包括高精度热流测量、深潜器、地质与地球化学、水深与旁侧声纳及大量热流数据,尤其是四个DSDP/ODP航次(31、87、131、190)的钻探数据资料等。值得指出的是,1999年6~8月日美合作采集了 $(80\times 8)\text{ km}^2$ 三

维多道地震数据。目前,日本已圈定其周边海域12个天然气水合物分布区,用体积法估算在其南海海槽、富山海槽、日本海东部边缘、Choshi 陆架山和种子岛东—日向—纳达等海域天然气水合物含甲烷资源量为 $4\times 10^{12}\text{ m}^3$,并报道全日天然气水合物含甲烷资源总量为 $(20.56\sim 142.3)\times 10^{12}\text{ m}^3$ 。

1997年,日本开始与美、加合作在阿拉斯加打一口示范井。1999年,日本石油公团在南海海槽水深900余米的海域完成井位调查并先后钻探了间隔100 m的6口探井,作业者JAPEx,经费预算50亿日元;先期钻探的两口井深度均250 m,其中采获的样品证实地层有足够的强度放置套管,实测地温梯度 $4^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,海底温度 $3\sim 4^{\circ}\text{C}$ 。根据天然气水合物物理化学相态平衡图(Dickens等,1994),估算稳定带底界深度 $250\sim 300\text{ m}$,证实这两口井钻穿了大部分稳定带地层;虽然在其岩心中未能观测到天然气水合物也未获得天然气水合物存在的证据,但由于发现部分孔隙水氯离子浓度含量低,推测可能存在天然气水合物。由于该处在新采集的剖面上BSR不连续,因此将原设计井位向SSE方向位移300 m,新井位处BSR连续,并解释其它BSR的不连续性与地层孔隙度和渗透率不均匀性有关;在倾斜的高孔隙度砂层内可能含水平BSR,而非渗透性泥岩不含水合物故无BSR。

1999年11月16日主孔开钻,于11月19日~12月2日在1110~1146 m与1151~1175 m进行常规取心,5次取心率为 $35.5\text{ m}/60\text{ m}$ 。在1254~1272 m的取心使用了保温保压取心器,取心率仅为 $5.5\text{ m}/18\text{ m}$,大大低于常规取心器的取心率。根据岩心释放出大量天然气,样品异常低温与孔隙水氯离子浓度低,认为在1152~1210 m区间16 m的三层沉积物中存在天然气水合物,并获得了象“湿润的雪团”一样的天然气水合物样品,确定岩心中含天然气水合物矿层最高可达20%。据此,估算了南海海槽天然气水合物含甲烷资源量,约占日本全国资源总量的58%,达 $2.71\times 10^{12}\text{ m}^3$ (Satoh,1996)或 $(3.35\sim 16.76)\times 10^{12}\text{ m}^3$ (Satoh,2003)。

目前,以日本为主导,已经结束在加拿大西北部永久冻土带地区麦肯齐河三角洲Mallik 2L-38井—4L-38井的钻探,进而推进了人类大规模工业性开发利用天然气水合物甲烷的进程;也表明日本力求争取在天然气水合物开发领域在研究与实验方面保持领先地位的意图。目前,日本计划实施其海域天然气水合物商业性开发的时间是2010年,要比美国提

前5年。

4. 加拿大天然气水合物资源勘查与评估

在加拿大西北部永久冻土带钻探的天然气水合物开发井——麦肯齐河(Mackenzie)三角洲 Mallik 2L-38 井世界闻名。该井深 1150 m, 由 JAPEX (日本石油勘探公司)、JNOC (日本国家石油公团) 和 GSC (加拿大地质调查局) 联合在 39 天内完成; 该井于 897~952 m 的永久冻土层采获 37 m 保留了天然气水合物层序互层特征的岩心。其中, 碎屑砂岩和砾石层孔隙度分别为 32%~45% 和 23%~29%, 稳定带厚度从 200~800 m, 估算圈闭在 Mallik 井构造中天然气水合物含甲烷资源量为 $1.1 \times 10^{11} \text{ m}^3$ (Collett 等, 1999), 相当于一个超大型气田的资源量规模, 分别占加拿大天然气总资源量的 0.4% 和全加天然气年产量的 60%。目前, 在取得大量实际开发资料基础上, 集中在该地的加、日、美、印等 6 国科学家已经完成 Mallik 4L-38 井的钻探, 开始进行新一轮的综合研究工作。

2001 年, 加拿大对其全国天然气水合物进行了资源评价, 完成了麦肯齐河三角洲—波弗特海, 北极群岛、大西洋边缘、加拿大西海岸的太平洋边缘 4 个海陆区带的工作。保守估算加拿大天然气水合物含甲烷资源 $(0.44 \sim 8.1) \times 10^{14} \text{ m}^3$, 而常规天然气资源量为 $0.27 \times 10^{14} \text{ m}^3$, 即该区天然气水合物含甲烷资源是其常规天然气资源的 1.6~30 倍。其中, 麦肯齐河三角洲—波弗特海地区为 $(0.24 \sim 8.7) \times 10^{13} \text{ m}^3$, 北极群岛地区 $(0.19 \sim 6.2) \times 10^{14} \text{ m}^3$, 大西洋边缘地区 $(1.9 \sim 7.8) \times 10^{13} \text{ m}^3$, 太平洋边缘地区 $(0.32 \sim 2.4) \times 10^{13} \text{ m}^3$ (Majorowicz, 2001)。

5. 南美巴西—秘鲁天然气水合物资源评估

在南美洲, 巴西针对大西洋沿岸大陆边缘末端部分亚马逊 Pelotas 盆地和 Foz cho 盆地深海沉积物天然气水合物中含甲烷资源潜力分别进行了评估。指出 Pelotas 盆地天然气水合物出现的范围达 $4.5 \times 10^4 \text{ km}^2$, 水深变化范围 500~3500 m; 但认为在 Foz cho 盆地天然气水合物分布局限。由于在该两个盆地的工作程度较低, 可资利用的资料较有限, 故在评估时对比利用了 ODP164 航次的钻井参数, 其预测评价的 Pelotas 盆地天然气水合物含甲烷资源为 782 TCF, 这在世界范围内也可算得上是较大的资源潜量。

在秘鲁的相关发现表明, 当沉积物含碳量小于等于 1% 时, 地震测线上无 BSR 记录; 而在快速下降盆地中, 当沉积物含碳量为 4%~8% 时, 地震测线上

也无 BSR 记录; 在构造上升区富碳沉积物的地震记录 BSR 明显, 其下游离气的厚度达到 5.5~17 m, 而在 BSR 反射较弱时, 游离气的厚度要小于 5.5 m 甚至完全缺失。十分重要的是, ODP688 站位在地震解释 BSR 反射较弱与空白处钻井, 于 -141 m 成功发现了天然气水合物。

6. 刚果天然气水合物资源评估^①

在非洲, 刚果针对岸外地震资料进行了天然气水合物中含甲烷资源量评估。评估区天然气水合物矿层不连续分布在海底以下 200~600 m, 水深一般大于 1200 m。确定控制天然气水合物形成和分布的主要地质条件是刚果峡谷。广泛分布的天然气水合物和下伏游离气的出现十分接近峡谷。峡谷北部天然气水合物分布变得断断续续。在这里, 天然气水合物的存在可能与下伏上中新世沉积的深水峡谷杂岩存在有关; 峡谷展布与天然气水合物赋存关系密切, 并认为峡谷可能作为运移气体的可渗透导管促进了后期天然气水合物矿层的形成。

7. 亚洲各国天然气水合物调查与资源评估^①

巴基斯坦多次借助它国科学家及其深海调查船开展天然气水合物调查工作, 在水深 500~3300 m 的莫克兰增生楔地区发现了 BSR 反射, 目前该项工作发表的公开性成果集中在研究区热流和针对 BSR 异常反射的评价研究方面。这些工作起始于 1982 年英国剑桥大学科学家的早期工作, 和 1997 年到 1998 年借助于德国“太阳号”调查船完成的数次调查航次的成果。

印度对天然气水合物的投入相当于 9000 万元人民币/年(1996~2000), 目前分别在其东、西部近海的孟加拉湾与阿拉伯海开展天然气水合物调查研究工作。在印度洋西北部的阿曼湾已发现有天然气水合物存在的证据。DSDP 曾在帝汶海槽轴部以南, Ashmore 礁西北 230 km, 水深 2315 m 处钻探了 262 号孔, 该孔上部 300 m 的岩心显示出很强的含气性, 并由此推测 262 号孔岩心含有丰富的天然气水合物。

韩国视天然气水合物研究为其最为重要的研究学科之一。该国首先由地质矿产与资源研究所于 1997~1999 年度在 Ulleung (郁龙) 盆地局部地区完成了天然气水合物地球物理调查, 由此确定了天然气水合物矿床存在的可能性。之后其 MOCIE (商业、工业和能源部) 制定了天然气水合物长期规划蓝图。从 2000 年开始, 韩国稳定地执行该规划调查和研究三阶段第一阶段五年计划的年度任务。其中,

将主要完成其管辖海域内区域地球物理调查和评价。目前,韩国已在郁龙(Ulleung)盆地东南部和西南部(斜坡区)发现了变形BSRs,尤其在该盆地北部发现较为典型BSR,含气沉积物存在有麻坑(pock-mark)标志,在浊积岩顶部发现富菱锰矿(天然碳酸锰—carbonate Mn)结核;其底水温度 $0\sim 1^{\circ}\text{C}$,地温梯度 $37\sim 39^{\circ}\text{C}$,沉积物平均热流 2.35HFU ;水深 2050 m ,埋深 200 m ;BSR之下并发现较大规模浅层天然气。

8. 德国的天然气水合物资源调查研究工作

由于领海水浅,所以德国没有天然气水合物资源。但是德国投入9000万马克设立了国家天然气水合物调查研究专项,组织实施了德、美、加、俄4国合作项目。其中,德国“太阳号”科学调查船的活动和成果在全球最为引人注目。1999年7~9月,该船在ODP892航次首次采用高技术系列在“水合物海岭”(Hydrate Ridge, $44^{\circ}40'\text{N}$, $125^{\circ}06'\text{W}$)水深 782 m 的海底利用采集(利用实时摄像系统,容积 0.5 m^3 的大型抓斗在深海海底表层),原地合成(利用特殊玻璃试管在深海海底甲烷溢气口),取样(利用多管深水浅孔取样器在深海底浅表层)等3种不同的方法同时获得了天然气水合物冰晶体样品实物,这在国际上尚属首次。同时,还在调查中使用了旁侧声纳技术与声波探测技术分别完成了海底地貌调查和海底甲烷气柱的探测;工作中并租用了美国“阿尔文”(Alvin)号深潜器。成果包括大块状天然气水合物样品,和在多个 $50\sim 150\text{ cm}$ 长岩心柱中发现了成层状、星点—结核状天然气水合物。

“水合物海岭”海域深海沉积物岩性与布莱克海台相同,也为灰绿色含有孔虫和富含钙质超微化石的软泥,地质时代晚更新世—全新世;沉积速率更高,达 $28\sim 70\text{ cm/ka}$ 。

①本文成文中参考了多次国际会议的资料。

参 考 文 献

- 1 Kvenvolden K A . Gas hydrates — geological perspective and global change . *Reviews of Geophysics* , 1993 ; 31 (2) : 173—187
- 2 Sloan E D . *Clathrate hydrate of natural gas* . Marcel Dekker , New York , 1990
- 3 Sloan E D . Clathrate hydrate measurements : microscopic , mesoscopic & macroscopic . *Chemical Thermodynamics* , 2003 ; (35) : 41—53

- 4 Kvenvolden K A . Gas hydrate as a potential energy resource : a review of their methane content . Howell D G , ed . *The Future of Energy Gases* , *Geology Survey Profession Paper U S* , 1993 ; 1570 : 555—561
- 5 Kvenvolden K A . Worldwide distribution of subaquatic gas hydrate . *Geo-Marine Letters* , 1993 ; 13 : 32—40
- 6 Paull C K , Matsumoto R , Wallace P J *et al* . Initial Reports of Ocean Drilling Program . College Station , Texas A & M University (Ocean Drilling Program) , 1996 : 164
- 7 Paull C K , Matsumoto R , Wallace P J *et al* . proceeding of Ocean Drilling Program , Scientific Results . College Station , Texas A & M University (Ocean Drilling Program) , 2000 : 164
- 8 许红 , 刘守全 , 王建桥等 . 国际天然气水合物重要研究进展简述 . *地球科学* , 2001 ; (10) : 1—5
- 9 MacDonald G T . The future of methane as an energy resource : *Annual Review of Energy* , 1990 ; (15) : 53—83
- 10 MacDonald G T . Role of methane clathrates in past and future climates : *Climatic Change* , 1990 ; (16) : 247—281
- 11 Alexei V Milkov , Roger Sassen , . Estimate of gas hydrate resource , northwestern Gulf of Mexico continental slope . *Marine Geology* , 2001 ; 179 : 71—83
- 12 金庆焕 . 天然气水合物几个值得考虑的问题 , 海洋地质动态 , 2001 ; (7) : 1—2
- 13 Galimov E M , Kvenvolden K A . Concentrations & carbon isotopic compositions of CH_4 & CO_2 in gas from sediments of the Blake Outer Ridge , deep sea drilling project leg 76 . In : Sheridan R E , Gradstein F W , Barnard , L A , *et al* . Initial Reports , Deep Sea Drilling project 76 . Washington , DC : US Government Printing Office , 1983 : 403—407
- 14 Alexei V Milkov , Roger Sassen . Estimate of gas hydrate resource , northwestern Gulf of Mexico continental slope . *Marine Geology* , 2001 ; 179 : 71—83
- 15 Вассилев А . Оценка пространственного распределения и запасов газогидратов в черном море . *Геология и геофизика* , 2002 ; 43 (7) : 672—684
- 16 宋海斌 , 松林修 . 日本南海海槽天然气水合物研究现状 . *地球物理学进展* , 2001 ; 16 (2) : 88—98
- 17 Satoh M . 南海海槽等海域天然气水合物资源评价 , 天然气地球科学 , 2003 ; 14 (6) : 512—513
- 18 Suji Y , Furutani A , Matsuura S , Kanamori K . Exploratory surveys for evaluation of methane hydrates in the Nankai Trough area , offshore central Japan . *Methane hydrates : Resources in the near future* , JNOC TRC , 1998 : 15—25

- 19 Dallimore S R, Uchida T, Collett T S. Scientific Results from JAPEx/JNOC/GSC Mallik 2L—38 Gas hydrate research well, Mackenzie Delta, Northwest Territories Canada. *Bull Geol Surv Canada*, 2002;544
- 20 Majorowicz J A. Gas hydrate distribution & volume in Canada. *AAPG Bull*, 2001;85(7):1211—1230
- 21 Suess E, Bohrmann G, Greinert J *et al*. Brennendes Eis: methane hydrate am Meeresgrund. *Spektrum der Wissenschaft*, 1999;62—73
- 22 Trehu A M, Torres M E, Moore G F *et al*. Temporal & spatial evolution of a gas hydrate-bearing accretionary ridge on the Oregon continental margin. *Geology*, 1999;27(10):939—942
- 23 Bohrmann G, Linke P, Suess E *et al*. FS SONNE Cruise Report SO143. *Geomar Report*, 2000;93
- 24 Su X, K H Baumann, Thiede J. Calcareous nannofossils from Leg 168: Biochronology & Diagenesis. Fisher A, Davis E E, Escutia C, eds. *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results 168*, College Station, TX (Ocean Drilling Program), 2000;168
- 25 Kvenvolden K A. A review of the geochemistry of methane in natural gas hydrates. *Organic Geochemistry*, 1995;23(11/12):997—1008
- 26 Markl R G, Bryan G M, Ewing J I. Structure of the Blake-Bahama outer ridge. *J Geophys Res*, 1970;75:4539—4555
- 27 Holbrook W S, Hoskins H, Wood W T *et al*. Methane hydrate and free gas on the Blake ridge from vertical seismic profiling. *Science*, 273:1840—1843
- 28 Posewang J, Mienert J. The engima of double BSRs: Indicators for changes in the hydrate stability field. *Geo Marine Lett*, 1999;19:150—156
- 29 Andreassen K, Mienert J, Bryn P *et al*. A double gas hydrate related bottom simulating reflector at the Norwegian continental margin, The Annals of the New York Acad of Sci, 2002;912:126—135
- 30 Kvenvolden K A. A review of the geochemistry of methane in natural gas hydrates. *Organic Geochemistry*, 1995;23(11/12):997—1008
- 31 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. *地球科学进展*, 1999;14(2):201—204
- 32 Shipley T H, Diczky B M. Occurrence of methane hydrates offshore southern Mexico. In: Watkins J S, Moor J C, Bachman S B *et al*, eds. *Initial Reports, DSDP66*. Washington, DC: US Government Printing Office, 1982;547—555
- 33 Hall A. *Igneous Petrology* (2nd). London: Longman Group Limit, 1996
- 34 Mathews M. Logging Characteristics of Methane Hydrate, the Log Analyst, 1986;27(3):26—63
- 35 Collet T S, Ladd J. Detection of gas hydrate with down-hole logs, and assessment of gas hydrate concentrations (saturation) and gas volumes on the Blake Ridge with electrical resistivity log data. Paull C K, Matsumoto R, Wallace P J *et al*. *Proceeding of ODP, Scientific Results*. College Station, Texas A & M University (ODP), 2000;164:179—192
- 36 Hesse R, Frape S K, Egeberg P K *et al*. Stable isotope studies (Cl, O, and H) of interstitial waters from Site 997, Blake Ridge gas hydrate field, West Atlantic. Paull C K, Matsumoto R, Wallace P J *et al*. *Proceeding of ODP, Scientific Results*. College Station, Texas A & M Uni(ODP), 2000;164:129—138
- 37 Wood W T, Ruppel C. Seismic and thermal investigations of the Blake Ridge gas hydrate area; a synthesis. Paull C K, Matsumoto R, Wallace P J *et al*, eds. *Proceeding of ODP, Scientific Results*; College Station, Texas A & M University (ODP), 2000;164:253—264
- 38 Wood W T, Holbrook W S, Hoskins H. In situ measurements of P-wave attenuation in the methane hydrate- and gas-bearing sediments of the Blake Ridge, Paull C K, Matsumoto R, W P J *et al*. *Proceeding of ODP, Scientific Results*. College Station, Texas A & M University (ODP), 2000;164:265—272
- 39 Summerhayes C P, Gilbert D. Distribution, origin and hydrocarbon potential of organic matter in sediments from the pacific margin of southern Mexico. In: Watkins J S, Moor J C, Bachman S B *et al*, eds. *Initial Reports, DSDP66*. Washington, DC: Government Printing Office, 1982;541—547
- 40 Harison W E, Curade J A. Gas hydrates in sediments of holes 497 and 498A, deep sea drilling project leg 67. In: Aubouin J, von Huene R, Azema J *et al*, eds. *Initial Reports, DSDP67*. Washington, DC: US Government Printing Office, 1982;591—594

(收稿日期 2005-01-28 编辑 黄君权)