

国家自然科学基金项目 (40746028) 资助

杨木壮 王明君 吕万军 著

南海西北陆坡 天然气水合物成矿条件研究

G Geological Factors for Gas
Hydrates Formation &
Distribution in the Northwest
Continental Slope of the South
China Sea



气象出版社
China Meteorological Press

国家自然科学基金项目(40746028)资助

南海西北陆坡天然气 水合物成矿条件研究

杨木壮 王明君 吕万军 著

地质出版社

内容简介

本书从温度、压力、地质构造、沉积、烃类气体来源和地球化学等方面,系统地论述了南海西北部有利的天然气水合物成矿条件,预测研究区内天然气水合物稳定带潜在厚度分布情况,探讨了天然气水合物成矿机制,对南海西北部乃至我国各海域的天然气水合物成矿研究、资源前景预测和勘探开发规划部署具有较大的学术参考价值。

本书资料丰富,图文并茂,可供广大地学与能源矿产工作者,特别是从事海洋地质和天然气水合物调查与研究的技术人员参考,也可供高等院校的地学与能源相关专业师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

南海西北陆坡天然气水合物成矿条件研究/杨木壮,
王明君,吕万军著. —北京:气象出版社,2008.8
ISBN 978-7-5029-4334-9

I. 南… II. ①杨…②王…③吕… III. 南海-天然气
水化物-成矿条件-研究 IV. P618.130.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 123535 号

Nanhai Xibei Lupo Tianranqi Shuihewu Chengkuang Tiaojian Yanjiu

南海西北陆坡天然气水合物成矿条件研究

杨木壮 王明君 吕万军 著

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室:010-68407112

网 址:<http://cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:王萃萃 李太宇

封面设计:博雅思企划

印 刷:北京京科印刷有限公司

开 本:889mm×1194mm 1/32

字 数:156 千字

版 次:2008 年 8 月第 1 版

定 价:20.00 元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcsb@263.net

终 审:纪乃晋

责任技编:吴庭芳

印 张:4.125

印 数:1~800

印 次:2008 年 8 月第 1 次印刷

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换。

序

天然气水合物具有能量密度高、分布广、规模大、埋藏浅、成矿物化条件优越等特点,被普遍认为可能是未来石油、天然气的理想替代能源和重要战略资源。同时,天然气水合物的分解是海底地质灾害的重要诱发因素,天然气水合物释放出的甲烷还是一种对气候带来严重影响的温室气体,甲烷的温室效应问题已成为国际上的一个前沿课题而受到人们高度重视。因此,无论从寻找战略储备能源角度看,还是从灾害防治和维护人类生存环境的角度看,天然气水合物研究均具有重要意义。

20 世纪 90 年代以来,天然气水合物调查与研究在世界范围内迅速扩大和深入,全球海域天然气水合物矿点的发现与日俱增,世界上对天然气水合物的研究方兴未艾。2002 年 1 月,日本与加拿大合作在加拿大北部冻土带麦肯齐三角洲 Mallik 2L-38 井试验开发天然气水合物获得成功,带来了开发利用天然气水合物的新世纪曙光。目前,美国和日本宣称,将在 2015 年前后进行天然气水合物矿藏的商业性开采。我国在这一领域的研究和调查起步较晚,20 世纪 80 年代至 90 年代,国内有关单位和学者对国外调查研究情况进行了跟踪调研和文献整理,实际的天然气水合物资源调查自 1999 年才开始。可喜的是,2007 年 5 月,我国在南海北部神狐海域成功钻获天然气水合物实物样品,证实了我国南海北部蕴

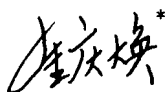
藏有丰富的天然气水合物资源。我国正在酝酿准备 2015 年左右对天然气水合物资源进行试开采。

随着大量实测数据的成功获取和以实际调查资料 and 成果为依托的天然气水合物研究的全面启动,越来越多的有关天然气水合物资源的论著不断涌现。总体上看,这些论著主要是对国际上有关天然气水合物的成矿条件、分布规律、形成机理、勘查技术、经济评价、环境效应与环境保护等研究成果的总结,并对我国天然气水合物资源调查与研究成果进行了宏观的陈述,而以专著形式对某一具体区域的天然气水合物成矿条件进行系统深入的研究则鲜有所见。

南海西北陆坡具有优越的天然气水合物成矿物化条件和地质构造环境,是我国海域天然气水合物调查与评价工作的发源地和重点海区,对其天然气水合物成矿规律和资源远景进行深入探讨对我国的天然气水合物调查与研究具有重要意义。本书作者自 1999 年我国开始进行海洋天然气水合物资源调查之时就从事相关的调查和研究工作,直接主持或参与了多项天然气水合物调查资料的解释、分析和研究工作,拥有较丰富的成果积累。本书在实际调查资料及天然气水合物存在的地球物理证据的基础上,从温度、压力、地质构造、沉积、烃类气体来源等方面,详细分析南海西北部有利的天然气水合物成矿条件,预测区内天然气水合物稳定带潜在厚度分布情况,探讨天然气水合物可能的成矿机制。显然,这些研究内容都是本区天然气水合物调查与评价迫切需要回答的关键问题,对本区乃至我国海域的天然气水合物资源前景预测和勘探开发规划部署,具有重要的实用价值,对发展我国天然气水合物成矿地质研究,也具有的重要的科

学意义。

相信本书能为广大地学与能源矿产工作者,特别是从事海洋地质和天然气水合物调查与研究的技术人员提供有益的参考,希望作者在以后的研究中取得更大的成就。

A handwritten signature in black ink, reading '金庆焕' (Jin Qinghuan), with a small asterisk superscript to the right.

2008年6月

* 金庆焕,中国工程院院士

前 言

能源是人类社会存在和发展不可或缺的战略资源,是经济发展和社会进步的重要物质基础。我国经济快速发展需要巨大的能源供给,能源短缺已是不争事实。根据 2000—2005 年国土资源部、国家海洋局统计公报整理可知(杨木壮等,2007),2000 年以来,我国石油消费量逐年呈较大幅度的攀升,从 2000 年的 1.95 亿 t 攀升到 2005 年的约 3.0 亿 t,平均年递增 9.2%;而我国原油产量保持了稳中有增的态势,2000 年产量为 1.63 亿 t,2005 年产量达到 1.81 亿 t,平均年递增只有 2.1%,但已接近国内原油产量的高限。由于产量远远不能满足大幅度增加的需求,使得原油供应缺口不断扩大,进口激增。2000 年我国原油净进口 0.32 亿 t,到 2005 年原油净进口量已达 1.19 亿 t,平均年递增高达 32.6%,进口依存度达到 40%。专家预测,在未来一个较长时期,我国仍将从国外进口大量的石油和天然气,油气对外依存度维持在 40%~60%水平,能源安全形势较严峻,至 2010 年,我国进口石油将达到 2 亿 t。随着我国进口石油数量的不断增加,国际突发事件和国际市场石油价格的不断攀升,对我国石油的安全供应和经济增长将产生重大影响,甚至危及我国的国家安全。因此,能源短缺已成为制约我国经济与社会可持续发展的瓶颈。如何应对能源短缺,是我国当前面临的一个重大战略问题。

21 世纪是海洋开发的时代。随着陆地资源的逐渐枯竭,人类把目光转向了另一个巨大的资源宝库——辽阔的海洋。占地球面积 70.8% 的海洋蕴藏着丰富的资源,也是地球上尚未充分开发利用的最大资源宝库。海洋不仅为人类提供食品、矿物、运输、旅游休闲及水资源等,而且将在新能源开发上扮演着重要角色,开发海洋已经成为各国解决经济持续发展的重要组成部分,新的海洋能源产业方兴未艾。有专家预计,在 2020 年后,全球海洋能源的利用率将是目前的数百倍,发展海洋能源将成为解决陆地能源问题的一条必由之路。海洋能源除了可再生的物理能源(潮汐能与潮流能、波浪能、海水温差能、风能)和化学能源(盐差能等)外,主要是海底能源矿产,包括海底石油与天然气、海底煤矿和迄今尚未被正式开发利用的天然气水合物(或称“可燃冰”)。据不完全统计,海底蕴藏的油气资源储量约占全球油气储量的 1/3。最近的勘探研究统计结果表明,世界海洋石油总储量达 $1450 \times 10^8 \text{ t}$,天然气约 $45 \times 10^{12} \text{ m}^3$,海底油气开发将从浅海大陆架延伸到千米水深的海区。目前海洋油气年产量已超过 $13 \times 10^8 \text{ t}$,占世界油气总产量的 40%,海洋油气的产值已占整个海洋产业的 60% 以上(朱晓东等,2005)。

天然气水合物(gas hydrates)是由水分子和气体分子组成的、具有笼状结构的似冰状结晶化合物,因其中的气体多以甲烷为主($>90\%$),故也被称为甲烷水合物(methane hydrates)。天然气水合物多呈白色或浅灰色晶体,其外貌极像冰雪或固体酒精,点火即可燃烧,因此有人称其为“可燃冰”、“气冰”、“固体瓦斯”等。

天然气水合物形成于具有特定低温—高压条件的自然

环境中,广泛分布于陆地永冻带和水深大于 300 m 的深水海底,通常呈分散状胶结沉积物颗粒,或者以结核状、弹丸状(pellets)和薄层状的集合体形式赋存于沉积物中,还可能以细脉状充填于沉积物的裂隙之中。

天然气水合物能量密度很高,燃烧产生的能量比同等条件下的煤、石油、天然气产生的能量多得多。按理论计算,在标准条件下,1 m³ 饱和天然气水合物可释放出 164 m³ 的甲烷气体,是其他非常规气源岩(诸如煤层、黑色页岩)能量密度的 10 倍,是常规天然气能量密度的 2~5 倍。因此,天然气水合物是迄今所知的最具价值的海底能源矿产资源,已引起许多国家和地区的政府、组织及科学家的高度关注和重视。据 Kenvolden(1988)估算,全球天然气水合物中蕴藏的碳资源量达 $(1.8 \sim 2.1) \times 10^{16} \text{ m}^3$, 大约相当于全球已探明传统化石燃料(包括石油、天然气和煤炭)碳总量的两倍,其中绝大多数分布于深水海底沉积物中。当然,也有学者(Soloviev, 2002)指出,全球海洋中天然气水合物的气体总量仅为 $1.8 \times 10^{14} \sim 1.0 \times 10^{15} \text{ m}^3$, 但这个数字也比常规的天然气储量要大得多,加上天然气水合物具有埋藏浅、物化条件优越等优点,毫无疑问会成为未来可供开发利用的重要能源矿产(杨木壮等, 2002)。同时,天然气水合物在燃烧以后几乎不产生任何残渣或废弃物,污染比煤、石油、天然气等要小得多。其巨大的资源量和诱人的开发利用前景使它很有可能在 21 世纪成为煤、石油和天然气的替代能源。据统计,截止 2002 年底,世界上已直接或间接发现了天然气水合物矿点共有 116 处,其中海洋(包括少数深水湖泊)107 处,单个矿田面积可达数千至数万平方千米,储量可达数万亿至数百万亿立方米。同

时,天然气水合物的分解是海底地质灾害的重要诱发因素,现已查明,世界各大陆边缘的海底滑塌、滑坡和浊流作用,以及黑海和巴拿马北部近海的海底泥火山都是海底天然气水合物分解所致。另外,天然气水合物释放出的甲烷还是一种重要的温室效应气体,甲烷的温室效应问题已成为国际上的一个前沿课题而受到人们的高度重视。总体而言,无论从寻找战略储备能源角度看,还是从灾害防治和维护人类生存环境的角度看,天然气水合物研究均具有重要意义。

目前,天然气水合物研究在世界范围内方兴未艾,尤其自 20 世纪 90 年代以来,天然气水合物调查与研究在世界范围内迅速扩大和深入,而我国在这一领域的工作近十几年才迅速兴起。自 1999 年以来,我国陆续开展了海域天然气水合物资源调查研究工作,并于 2002 年初经国务院批准设立了国家专项(专项由国土资源部广州海洋地质调查局承担)。初步调查与研究成果表明,我国南海、东海海域很可能存在潜力巨大的天然气水合物资源。其中,南海西北陆坡具有优越的天然气水合物成矿的物化条件和地质构造环境,是我国海域天然气水合物调查与评价工作的发源地和重点海区。1999 年,利用高分辨率多道地震调查手段,在该区首次发现了天然气水合物存在的重要地球物理证据——似海底反射波(BSR),拉开了我国天然气水合物资源调查的序幕;在后来的调查研究中,除进一步识别出更多的 BSR 显示外,还先后发现了 BSR 之上的地震反射振幅空白(Blanking)、BSR 波形极性反转、速度结构异常等反映天然气水合物存在的地球物理证据,以及可能反映地层中天然气水合物形成与分布的海底浅表层地质、地球化学异常特征。

笔者自 1999 年我国开始进行海洋天然气水合物资源调查之时就从事相关的调查和研究工作,直接主持或参与了多项天然气水合物调查资料的解释、分析和研究工作,已完成八项与天然气水合物有关的研究成果报告,包括国家“863”子课题“天然气水合物资源综合评价技术”、中国科学院边缘海重点实验室基金课题“南海东北复合陆缘天然气水合物形成机制研究”等,主持在研国家自然科学基金“南海东北复合陆缘天然气水合物储集层的层序地层学研究(40746028)”。

本专著是笔者多年来从事南海西北陆坡天然气水合物研究的成果总结,通过查阅大量国内外有关文献和专著,力求充分了解和吸收当前国内外天然气水合物成矿研究新成果,紧密结合南海天然气水合物资源调查与研究的实际工作,解释分析了 6000 多千米新旧多道地震资料和 38 个站位的海底浅表层沉积物样品,以及 90 多个气态烃测试数据,计算了 750 多个点位的天然气水合物稳定带潜在厚度数据等。本书在实际调查资料及天然气水合物存在的地球物理证据的基础上,从温度、压力、地质构造、沉积、烃类气体来源和地球化学等方面,详细分析南海西北陆坡有利的天然气水合物成矿条件,预测区内天然气水合物稳定带潜在厚度分布情况,探讨天然气水合物成矿机制,希望为南海西北陆坡乃至我国海域的天然气水合物成矿研究、资源前景预测和勘探开发规划部署提供科学参考依据。

本书共有六章。第 1 章从国内外天然气水合物调查与研究概况、天然气水合物形成的温度与压力条件、天然气水合物形成与分布的地质构造环境、含天然气水合物的沉积物特征、成矿气体来源及沉积物孔隙水地球化学条件等方面对

当前国内外天然气水合物成矿研究新进展进行了全面总结;第2章简述研究区南海西北陆坡地理位置及海底地形地貌、区域地质背景及油气地质条件等区域地理、地质概况;第3章重点叙述天然气水合物存在的地球物理证据,包括似海底反射波(BSR)分布及特征、振幅空白带特征、速度异常特征等;第4章从天然气水合物形成的温度和压力条件、有利地质构造条件、晚中新世以来的沉积特征、烃类气体异常及其来源等方面分析研究区有利的天然气水合物成矿条件;第5章通过对天然气水合物稳定带影响因素的详细分析和数值模拟,预测天然气水合物稳定带的厚度及其分布情况,探讨了南海西北陆坡天然气水合物成矿机制。第6章归纳总结了本专著的主要研究成果与认识。全书主要由杨木壮撰写,王明君参与编写第1章和第3章,吕万军参与编写第5章。

本书是在第一作者博士学位论文的基础上经修改和补充而成的。第一作者在攻读博士学位期间和撰写论文过程中始终得到导师李思田教授、金庆焕院士的悉心指导,得到解习农教授、王华教授、任建业教授、庄新国教授、杨香华教授、王龙樟教授以及博士班同学黄春菊博士、王振奇教授、邹华耀教授、李献甫博士等等的热心关怀和帮助。在项目研究过程中,得到了姚伯初教授、冯志强教授、黄永样教授、张光学教授、吴能友教授、白志琳教授的大力支持和指导,也得到了梁金强教授、沙志彬高工、陈芳教授等的热情帮助,在此一并深表感谢!

本书也是国家自然科学基金项目(40746028)研究的阶段成果,在此对国家自然科学基金委员会的大力支持表示衷心的感谢!

非常感谢中国工程院院士金庆焕教授亲自为本书作序！感谢气象出版社李太宇主任为本书顺利出版给予的大力支持和帮助！

由于作者水平所限和资料有限，文中错漏在所难免，敬请各位专家批评指正。

杨木壮

2008年5月

目 录

序

前言

第 1 章 天然气水合物成矿研究新进展	(1)
1.1 国内外天然气水合物调查与研究概况	(1)
1.2 天然气水合物形成的温度与压力条件	(5)
1.3 天然气水合物形成与分布的地质构造环境	(8)
1.4 含天然气水合物的沉积物特征	(20)
1.5 成矿气体来源及沉积物孔隙水地球化学条件	(22)
第 2 章 区域地理、地质概况	(24)
2.1 研究区位置及海底地形地貌	(24)
2.2 区域地质背景及油气地质条件	(25)
第 3 章 天然气水合物存在的地球物理证据	(35)
3.1 似海底反射波(BSR)分布及特征	(35)
3.2 振幅空白带特征	(45)
3.3 速度异常特征	(47)
第 4 章 天然气水合物有利成矿条件	(51)
4.1 天然气水合物形成的温度和压力条件	(51)
4.2 有利地质构造条件	(60)
4.3 晚中新世以来的沉积特征	(64)
4.4 烃类气体异常及其来源	(75)

第 5 章 天然气水合物稳定带预测与成矿机制探讨	
.....	(82)
5.1 天然气水合物稳定带影响因素	(82)
5.2 天然气水合物稳定带预测	(84)
5.3 天然气水合物成矿机制探讨	(94)
第 6 章 主要研究结果与问题	(102)
参考文献	(107)
Abstract	(113)

第 1 章 天然气水合物成矿研究新进展

1.1 国内外天然气水合物调查与研究概况

1.1.1 国外调查与研究概况

气体水合物的发现虽然可追溯至 1810 年,但人们对海洋天然气水合物的认识始于 20 世纪 70 年代中期(Claypool 和 Kaplan,1974)。70 年代,美国在阿拉斯加北部的普鲁德湾油田采获世界上第一个天然气水合物样品,在美洲海槽执行深海钻探计划时,在 20 个钻孔中发现有 9 个含有天然气水合物。80 年代,随着深海钻探计划(DSDP)和大洋钻探计划(ODP)的实施,全球海域直接发现的天然气水合物矿点已达到 20 余处,并开始运用除地震勘探方法以外的各种测井方法寻找天然气水合物,运用地球化学方法开展天然气水合物的形成标志、赋存特征及成矿气体来源等方面的研究。90 年代以来,天然气水合物调查与研究在世界范围内迅速扩大和深入,调查与研究的深度、广度以及调查技术水平大大提高。大洋钻探计划对天然气水合物的研究给予了高度重视,设立了专项调查航次,如 ODP164 航次在北美东南大陆边缘布莱克海台钻了三口井,利用 PCS(Pressured Core Sampler)技术

采获了天然气水合物样品, ODP141 航次以及 ODP146 航次也分别在智利大陆边缘和 Cascadian 大陆边缘发现了天然气水合物; 2001 年 8 月, ODP204 航次在美国俄勒冈岸外水合物脊又钻获天然气水合物。

当前国际上天然气水合物的调查研究已呈现多学科、多方法的综合发展趋势。理论研究方法方面, 开展了天然气水合物沉积学、成矿动力学、地热学以及天然气水合物相平衡的理论和实验模拟研究, 并对沉积物中气体的运移方式和天然气水合物的聚集机制进行了探索。找矿方法上, 除了首选的地球物理方法外, 测井技术、钻孔取样、旁侧声纳、浅层剖面、自生沉积矿物学法、地球化学以及海底摄像等综合手段都已得到较大的发展。其中, 用于水合物钻探取样的设备主要有: 1) 活塞式岩心取样器; 2) 保温岩心取样器; 3) 保压岩心取样器(PCS); 4) 欧洲刚刚研制的水合物取芯设备 HYACE (Hydrate Autoclave Coring Equipment) 已在 ODP193 航次(2001)投入使用。

目前, 世界上对天然气水合物的调查研究方兴未艾, 全球海域天然气水合物矿点的发现与日俱增。据统计, 截止 2001 年底, 世界上已有 84 处海域直接或间接发现了天然气水合物, 其中利用地震探测 BSR(海底反射波) 推测的有 48 处, 由 BSR 推测并取样的有 10 处, 由 BSR 与测井探测的有 8 处, 通过取样发现的有 9 处, 利用其他方法(速度异常、化探异常、特征地貌等)推测的有 9 处。2002 年 1 月, 日本与加拿大合作在加拿大北部冻土带麦肯齐三角洲 Mallik 2L-38 井试验开发天然气水合物获得成功, 带来了开发利用天然气水合物的新世纪曙光。目前, 美国和日本宣称将在 2015 年前