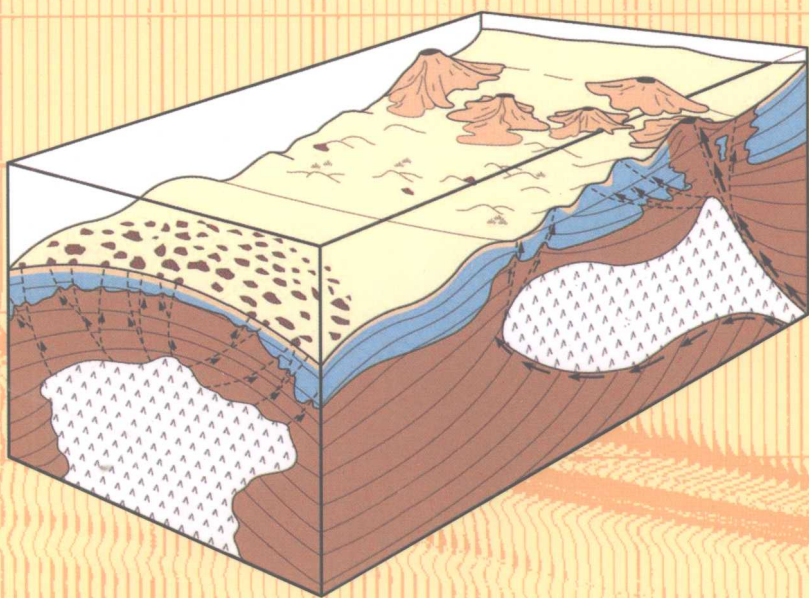


天然气水合物丛书

天然气水合物赋存的地质构造分析与资源评价

吴时国 姚伯初 等·著



科学出版社
www.sciencep.com

天然气水合物丛书

天然气水合物赋存的地质构造分析与资源评价

吴时国 姚伯初 等·著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是《天然气水合物丛书》之一。本书系统地论述了天然气水合物形成的地质构造背景及其在中国海域的分布规律。介绍了天然气水合物的地球物理识别技术和评价方法,并指出中国天然气水合物的资源勘探远景。

本书可供石油地质、海洋地质和环境地质等相关专业高年级本科生、研究生,海洋科研院所、石油公司和工业部门从事地质、海底矿产资源研究的有关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

天然气水合物赋存的地质构造分析与资源评价/吴时国,姚伯初等著. —北京:科学出版社,2008

(天然气水合物丛书/陈勇主编)

ISBN 978-7-03-020493-6

I. 天… II. ①吴…②姚… III. ①天然气水合物-石油天然气地质-地质构造②天然气水合物-资源-评价 IV. P618.130

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第170692号

责任编辑:李 敏 张 震/责任校对:陈玉凤

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年1月第一版 开本:B5(720×1000)

2008年1月第一次印刷 印张:20 3/4 插页:14

印数:1—1 500

字数:395 000

定价:80.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

本书得到国家“118”水合物专项研究课题“我国海域天然气水合物成藏的地质构造条件研究”(编号:200200203-02-03)、国家“863”计划项目“水合物分解引起的海底不稳定性的模拟研究”(编号:2006AA09A209-6)、中国科学院知识创新重要方向项目“大陆坡天然气水合物形成的地质条件和成藏机理研究”(编号:KZCX3-SW-219)等的资助。

《天然气水合物丛书》编委会

顾 问 (以汉语拼音为序)

程国栋 (中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 中国科学院院士)

戴金星 (中国石油集团科学技术研究院, 中国科学院院士)

金庆焕 (广东海洋地质调查局, 中国工程院院士)

金翔龙 (国家海洋局第二海洋研究所, 中国工程院院士)

秦蕴珊 (中国科学院海洋研究所, 中国科学院院士)

汪集旸 (中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院院士)

曾恒一 (中国海洋石油总公司, 中国工程院院士)

主 编 陈 勇 (中国科学院广州分院)

副主编 秦 伟 (中国科学院)

范蔚茗 (中国科学院)

黄宁生 (中国科学院广州分院)

执行副主编 吴时国 (中国科学院海洋研究所)

樊栓狮 (中国科学院广州能源研究所)

编 委 (以汉语拼音为序)

陈多福 (中国科学院广州地球化学研究所)

陈光进 [中国石油大学 (北京) 化工学院]

陈月明 [中国石油大学 (华东) 石油工程学院]

冯自平 (中国科学院广州能源研究所)

何生厚 (中国石油化工集团公司)

黄永样 (中国地质调查局广州海洋地质调查局)
金之钧 (中国石油化工集团勘探开发研究院)
李清平 (中国海洋石油总公司)
梁德青 (中国科学院广州能源研究所)
史 斗 (中国科学院文献情报中心)
宋海斌 (中国科学院地质与地球物理研究所)
宋永臣 (大连理工大学动力系)
宋之光 (中国科学院广州地球化学研究所)
吴能友 (中国地质调查局广州海洋地质调查局)
吴青柏 (中国科学院寒区旱区环境与工程研究所)
伍向阳 (中国科学院地质与地球物理研究所)
阎 贫 (中国科学院南海海洋研究所)
颜 文 (中国科学院南海海洋研究所)
祝有海 (中国地质科学院矿产资源研究所)

总序

我国油气资源量严重不足，寻找新的替代能源一直是一项国家长期能源战略。天然气水合物（gas hydrate）是在高压、低温条件下由水和天然气形成的笼状固态物，广泛分布于大陆边缘陆坡区海底和永久冻土带，是目前研究的一种极具前景的替代能源。研究显示，全球天然气水合物蕴藏的碳能源总量相当于全球已经探明的传统化石燃料总碳量的两倍，具有巨大的能源开发前景。然而，天然气水合物的存在对环境来说是一个巨大的挑战。天然气水合物分解能释放出160~180倍标准状态下的天然气，可以引发海底天然气快速释放和沉积层液化，产生大面积的海底滑坡，对海洋工程具有毁灭性的破坏作用。天然气水合物释放的甲烷是高效的温室气体，可能是全球气候变暖、冰期终止和海洋生物灭绝的驱动力。因此，对天然气水合物的研究是当代科学界的一个前沿研究热点领域，受到世界各国政府和学者的广泛关注。

我国于20世纪90年代初期开始了天然气水合物的研究工作，中国科学院一直是我国天然气水合物基础研究的先驱，引领着我国天然气水合物的研究方向。近年来，我国天然气水合物的调查和基础研究工作开展得如火如荼，科学技术部“863”计划、中国科学院知识创新工程、国家自然科学基金委员会等分别支持了我国天然气水合物的前沿、探索和基础项目。

为了顺应国家能源战略的需求，发挥中国科学院与其他研究机构的联合优势，中国科学院于2004年组建了中国科学院广州天然气水合物研究中心。该中心以广州能源研究所为依托单位，以广州地球化学研究所和南海海洋研究所为共建单位，





结合海洋研究所、地质与地球物理研究所、寒区旱区环境工程研究所、声学研究所、过程工程研究所、化学研究所、大连化学物理研究所、沈阳自动化研究所、计算机网络信息中心、资源环境科学信息中心等，形成了一支学科交叉、实干精练的研究队伍。通过两年的努力，完成了三项中国科学院知识创新工程方向性项目：提出了海洋天然气水合物的分类及渗漏型水合物的理论，新发现了两个潜在的渗漏型水合物发育区，建立了寻找浅埋藏渗漏型水合物的新方法；基本建成了国内领先的天然气水合物实验平台；加强了国际国内的合作与交流，积累了丰富的经验。

组织出版《天然气水合物丛书》是一项非常有意义的工作，可以及时总结研究成果、指导今后的工作，而且也培养我国天然气水合物的后备人才提供了较为系统的教材以及理论和研究方法的参考。该丛书的著者都是近年活跃在我国天然气水合物研究领域的中青年科技工作者，其中大多数是该领域的领军人物或研究员、教授，专业横跨海洋地质学、地球物理学、地球化学、石油天然气地质学、化学、工程热物理、能源工程等学科。该套丛书包括《天然气水合物——基本原理与应用技术》、《海底构造学导论》、《天然气水合物赋存的地质构造分析与资源评价》、《天然气水合物抑制技术》、《天然气水合物开采基础》和《天然气水合物研究进展》等许多分册。相信随着研究工作的深入，更深入、更全面的研究成果将会陆续问世。

我相信，该套丛书的出版，可对我国天然气水合物的研究提供有意义的参考；将得到更多的天然气水合物科学家和工程技术专家的积极支持和参与；也将会受到广大读者的欢迎。

中国科学院院士、中国工程院院士

沈南祥

2006年6月

序

天然气水合物是在高压、低温条件下，由天然气和水形成的笼状固态物，广泛分布在大陆边缘陆坡区和永久冻土带中。全球天然气水合物蕴藏的碳总量相当于地球上已探明的化石能源（石油、天然气、煤炭等）总碳量的两倍。因此，天然气水合物是一种具有巨大潜力的洁净能源，可能是未来石油、天然气和煤炭的替代物。与此同时，天然气水合物对全球碳循环与环境变化、海底地质灾害等方面有重大影响，因此对它的调查与研究成为当代科学界的一个前沿研究热点领域，受到世界各国政府和学者的广泛关注。

该书的作者吴时国教授是中国较早开展天然气水合物研究的研究者之一。他于1998~2000年在日本海洋科学技术中心做博士后研究时就开始了天然气水合物分布区的地质研究，并乘坐SHIN-KAI6500载人潜水器在南海海槽进行海底地质考察。2001年，他应邀参加香山科学会议，并作了日本南海海槽天然气水合物分布区的地质构造特征研究报告。主持了中国科学院第一个有关天然气水合物勘探方面的重要方向性项目“大陆坡天然气水合物形成的地质条件和成藏机理研究”（2002~2006年）；负责了“我国海域天然气水合物调查”专项的研究课题“我国海域天然气水合物形成的构造条件”（2002~2008年）；参加了国家天然气水合物的中长期规划的编写。该书的另一位作者姚伯初教授早在1982年访问美国地质调查所时，美国科学家就向他介绍了他们工作中发现的“bottom simulating reflector”，认为它是天然气水合物矿层底界面的反射波。他将此反射波翻译为“似海底反射波”，得到了国内同行的普遍接受。1985年和1987年，他在美国哥伦比亚大学拉蒙特-多尔蒂地球观测所工作期间，非常关注世界天然气水合物调查和研究工作的进展，多方收集资料。20世纪末，他最早参与中国天然气水合物立项



和在中国海域开展天然气水合物调查，并于1998年率先在国内发表有关天然气水合物的研究论文，揭示中国海域存在天然气水合物的地质地球物理证据。2001年，他也应邀参加香山科学会议，作了“南海海域天然气水合物”的报告。

该书综合国内外天然气水合物调查和研究的成果，结合中国海域的实际地质构造情况，讨论了天然气水合物的成藏构造环境、地球物理探测技术和中国海域天然气水合物成矿远景三方面的科学问题。在第一篇水合物的成藏构造环境中，分析和讨论了不同大陆边缘的天然气水合物分布特征及其成矿机理，以及天然气水合物富集的地质构造因素。在第二篇中，综合分析了天然气水合物调查中所使用的地球物理技术，如高分辨率地震、重力、磁力、地热流、海底地震仪、大地电磁测深和多波束测深等。在第三篇中，具体分析和讨论了中国海域的天然气水合物的发育状况、构造环境及其赋存的资源潜力，目的是让读者了解中国海域的天然气水合物资源前景，指导我们在中国海域开展天然气水合物的调查和研究工作。

该书的出版，必将加深我们对国内外天然气水合物调查和研究方面的现状及其理论和方法的了解，作为我们开展中国海域天然气水合物调查和研究工作的借鉴，指导我们的调查和研究工作。中国科学家刚刚于2007年5月在南海北部大陆坡喜获天然气水合物样品，故该书的出版将起着抛砖引玉的作用，吸引中国科学家积极投身于这一探索工作中去，结合中国海域的实际地质构造环境，完善天然气水合物的成矿理论及其调查和研究方法，使我们在这一科学新领域跟上国际步伐，作出应有的贡献。

该书是关于能源领域前沿性问题的著作，其问世是可喜可贺的，现推荐给读者，相信读后将受益匪浅。

中国工程院院士

2007年11月30日

前 言

当水和天然气在高压和冰点以上温度（科学实验证明最高温度小于 25°C ）的条件下混合时，会产生一种像冰一样的固态物质，称作天然气水合物。对天然气水合物的发现和研究工作已有近两百年的历史，Davy 于 1810 年第一次在实验室中发现用氯气和水生成的水合物；Faraday 于 1823 年、Villard 于 1888 年对天然气水合物进行了研究。他们的工作表明，在一定的温度和压力条件下，甲烷与乙烷均可产生水合物。Villard 于 1888 年从实验工作中获得甲烷形成水合物的温度-压力曲线，当时他已做到 $4000\text{psi}^{\text{①}}$ 的压力。Kobayashi 于 1949 年、Marshall 于 1964 年通过进一步实验，修改了 Villard 曲线，将压力增至 $10\,000\text{psi}$ 。20 世纪 30 年代，苏联科学家发现远东的石油天然气输送管道内存在由天然气与水所形成的水合物，阻碍了管道中石油和天然气的流动。

天然气水合物中的气体分子有 CH_4 、 C_2H_4 、 CO_2 、 H_2S 等。它是在一定温度-压力条件下由水和气体分子形成的，水分子形成刚性笼形晶格，每个笼形晶格中包含一个气体分子。单体天然气水合物的结构分为 I 型、II 型和 III 型。每种类型的基础是十二面体，这种十二面体由 12 个水分子组成。五角十二面体与六面体在一起，在 I 型天然气水合物中，形成 12 个五面体的晶面和两个六边形的晶面；在 II 型天然气水合物中，五角十二面体与六面体一起，形成 12 个五边形的晶面和四个六边形的晶面。在标准温度-压力条件下， 1m^3 甲

① $1\text{psi} = 6.894\,76 \times 10^3\text{Pa}$ ，下同。



烷水合物可释放 164m^3 的甲烷。因此,天然气水合物是一种具有巨大潜力的能源。地球上天然气水合物的资源量非常巨大,表1列出了科学家根据各自掌握的资料,从各自的认识水平及资料基础,采用不同估算公式计算的甲烷资源量。

表1 地球上天然气水合物中的甲烷资源量(单位: m^3)

永久冻土带	海洋	作者	年份
5.7×10^{13}	$(5 \sim 25) \times 10^{15}$	Trofimuk	1977
3.1×10^{13}	3.1×10^{15}	McIver	1981
3.4×10^{16}	7.6×10^{18}	Dobrynin	1981
1.4×10^{13}		Meger	1981
1.0×10^{14}	$(1.0 \sim 1.8) \times 10^{16}$	Mokogon, Kvenvolden	1998

从表1中看出,地球上的天然气水合物资源量是巨大的。Kvenvolden估计,全球天然气水合物中的碳储量达 $10 \times 10^{19}\text{g}$,相当于地球上石油、天然气、煤和其他生物中碳储量总和的两倍。

1959年,Katz对天然气水合物的形成条件及其转换特性进行了全面总结。1974年,Stoll等在布莱克海台沉积中观测到异常地震反射,他解释那里的沉积物中存在天然气水合物。他们的工作将海洋科学家的眼光吸引到海洋天然气水合物这一新领域。1974年,通过DSDP海上钻探,人类第一次直接从海洋沉积物中取得了天然气水合物样品。自此之后,美国、加拿大、英国、法国、德国、日本、印度和俄罗斯等国的科学家及政府对这种新矿藏非常感兴趣,在世界冰冻带及海域陆坡区进行了广泛的调查和研究。至今,他们已经在北美东海岸外陆缘、墨西哥湾、加勒比海、南美大西洋边缘、非洲大西洋边缘、北美和南美太平洋边缘、白令海、鄂霍茨克海、日本海、菲律宾海、南海、里海、黑海、贝加尔湖、地中海,以及北极地区、南极地区及其周边海域,均发现了存在天然气水合物的各种证据,或者直接取得了水合物样品。特别是关于水合物的ODP航次,如204航次(2004年)在北美俄



勒冈外水合物脊的钻探,不仅取得了大量水合物样品,还对水合物的形成环境、生长速率、沉积物中流体运动规律进行了研究。目前,美国、日本、德国、印度、韩国等国都先后制定了天然气水合物的国家计划,在本国海域或冻土带开展天然气水合物的调查和研究工作。美国能源部围绕天然气水合物的资源特征、开发、全球碳循环、安全及海底稳定性四个主题,制定了长达 10 年(2000~2010 年)的详细计划。日本先后制定了两个天然气水合物研究计划:1995~1999 年,日本通产省设立了“甲烷水合物研究及开发推进初步计划”;最近,日本又推出“21 世纪甲烷水合物勘探计划”(简称“MH21”),主要是开展试生产实验,为商业生产做技术准备,同时强调围绕开发应重视水合物的基础研究。有人估计,日本可能在五年内在其海域进行开发试验。欧洲自然科学基金委员会在其海洋科学计划中对天然气水合物的研究工作也异常重视,提出了三个亟待解决的问题:一是天然气水合物的生物地球化学成因;二是水合物、沉积物、水、气体系统的物理、化学、环境特征;三是调查技术。

姚伯初教授在 1982 年访问美国地质调查所时,美国科学家向他介绍了他们在做海洋地质调查时,发现地震剖面上存在一种特殊反射波,它和海底反射波平行,但和地层界面反射波相交,他们称这个反射波为“bottom simulating reflector”(BSR),他当时将其翻译成“似海底反射波”。美国科学家当时认为这是天然气水合物矿层底界面的反射波,一旦气候或海平面发生变化,这些水合物会分解,在陆坡上会发生海底滑坡,造成地质灾害。1998 年,我们利用南海采集的大量地球物理资料,追踪对比和解释了约 10 000km 地震剖面,发现这里存在天然气水合物的地震证据——BSR,特别是在南海北部;2001 年,我们又用世界上通用的公式估算出南海天然气水合物的资源量达 600 亿~700 亿 t 油当量。自 1999 年我们在南海西沙海槽地区开展天然气水合物调查以来,发现了大量存在天然气水合物的地质、地球物理和地球化学证据。



2001 年, 我们制定了“我国海域天然气水合物资源综合评价与勘探开发战略研究”国家计划, 广州海洋地质调查局具体执行这一计划, 目前已在南海北部做了大量调查, 对调查海域的天然气水合物进行了资源评价。2007 年 5 月在神狐海域进行了钻探, 取得了天然气水合物样品, 实现了中国海域天然气水合物调查与研究的重大突破!

海洋中天然气水合物的发现首先是在地震剖面上发现 BSR, 因此地震方法是调查前期采用的重要方法。当前, 高分辨率地震剖面是最重要的方法之一。在一个海区开展水合物调查时, 首先进行高分辨率地震调查, 发现和圈定 BSR 分布范围, 然后在此区域内进行地质地球物理和地球化学调查与研究工作, 确定水合物矿层的厚度、埋深、特征, 以及估算其资源量。在高分辨率地震剖面上, BSR 和海底反射波平行, 但相位相反, 而且在 BSR 之上会出现振幅空白带。如果水合物矿层之下存在游离气, 那么含水合物地层的地震速度会较高, 为 $1.9 \sim 2.3 \text{ km/s}$, 而下伏含游离气地层的速度仅为 $1.3 \sim 1.6 \text{ km/s}$ 。美国东海岸外布莱克海台上的地震剖面, 是显示天然气水合物存在的典型地震剖面, BSR 平行于海底反射波, 切割地层反射波, ODP 在该海域打钻, 取到水合物样品, 与地震剖面显示的一致。

地热流测量是另一种地球物理方法。水合物在温度达到 25°C 时, 无论压力多大, 都会分解成气和水。由于世界海洋的海底温度均在 0°C 左右, 所以一个海区的地温梯度小, 则其水合物的矿层就厚, 否则就薄。因此, 一个地区的地热流值就决定了其水合物矿层的厚度。

其他地球物理方法包括地磁测量、重力测量、大地电磁测深 (MT)、海底地震仪 (OBS)、多波束测深等。在水合物分布区打钻后, 要进行地球物理测井, 包括电阻率测井、自然电位测井、声速测井、密度测井、伽马测井、中子测井, 以及孔隙率测井等。由于含水合物沉积的孔隙和裂隙被冰状水合物充填, 所以其弹性特征发生了变化, 密度大, 孔隙率



低，声速高；由于水合物中不存在导电电子和离子，所以其电阻率大。

地质方法包括海底拖网取样、抓斗取样、箱式取样、柱状取样、活塞取样和浅钻取样等方法。取到地质样品后，进行各种分析，用来判断海底沉积物中是否存在天然气水合物矿藏。在采集了地质样品之后，需要进行下列地质和地球化学分析：①沉积物粒度分析、组分分析和物理性质分析；②黏土矿物分析；③沉积物中硫酸根、氯离子、有机碳和硫化物分析；④沉积物中磁性物的磁性分析；⑤对底层水进行盐度和甲烷富集度分析，以及对孔隙水进行化学与同位素分析；⑥对底栖有孔虫及其特性进行分析；⑦对孔隙水中的硼与氯同位素进行分析；⑧对采集的甲烷气进行碳同位素分析，以判断甲烷气是生物来源还是深部运移上来的裂解气。

本书综合了国内外天然气水合物调查和研究的资料，结合中国海域的实际地质构造情况，讨论了世界海域天然气水合物的成藏构造环境、地球物理探测技术和中国海域天然气水合物成矿地质构造条件及远景资源量等方面的科学问题。在第一篇中，首先分析和讨论了活动大陆边缘（俯冲增生楔、碰撞缝合带、挤压盆地）的天然气水合物分布特征及成矿机理，指出这些海域由于自晚新生代以来沉积速率快，浅层生物气发育；沉积物中断裂发育，流体活跃。因此，这里具有丰富的天然气水合物资源。然后，分析了被动大陆边缘的成藏条件。这类大陆边缘普遍发育着中新世代的沉积盆地，具有丰富的深层热解气，加上浅层生物气，因此这里也具有丰富的气源；这里垂直断裂发育，深层热解气沿断裂向上运移，到浅部加上浅层生物气，可以在某些部位生成天然气水合物矿藏。在某些被动大陆边缘，如南海北部，由于某些特殊构造因素，自晚新生代以来，发生了区域走滑构造活动，浅层沉积物中流体沿水平方向非常活跃，这里的天然气水合物非常丰富。在被动大陆边缘的某些上升流区，如北美东海岸外的布莱克海台，具有特殊的物理海洋条件，由于在北极冰盖



形成后,从北极来的冷水流和从赤道来的暖水流包围该海域,这里自晚新生代以来生物生产率很高,海底沉积物中的有机质非常丰富,从而使生物气也很丰富,因此这里也具有丰富的天然气水合物资源。在第二篇中,综合分析了天然气水合物调查中所使用的地球物理技术,包括高分辨率地震、重力、磁力、地热流、OBS、MT和多波束测深等。讨论了海上资料采集、资料处理和解释方法,特别强调综合地球物理处理和解释,以便尽量减少地球物理资料的多解性。在第三篇中,具体分析和讨论了中国海域的天然气水合物的发育状况、构造环境,以及其赋存的资源量,目的是让我们了解中国海域的天然气水合物资源前景,指导我们在中国海域开展调查和研究工作。

编写本书的目的是为了让我们了解国外在天然气水合物调查和研究方面的现状及其理论和方法,作为我们开展中国海域天然气水合物调查和研究工作的借鉴,指导我们的调查和研究工作。科学技术是第一生产力,我们在中国海域进行天然气水合物的调查和研究工作,必须借鉴国外先进国家的经验,使用高新技术,完善天然气水合物的形成理论和调查方法,才能取得事半功倍的功效。由于天然气水合物的成矿理论和调查方法目前处于待完善阶段,各国科学家在许多方面都在探索中。因此,中国科学家应该积极投身于这一探索工作中去,结合中国海域的实际地质构造环境,完善天然气水合物的成矿理论及其调查和研究方法,以便在这一科学新领域跟上国际步伐,做出应有的贡献。

本书共分三篇21章。具体分工如下:第1章由吴时国、姚伯初撰写;第2章由吴时国、张光学撰写;第3章由王秀娟、吴时国撰写;第4章由张光学、吴时国撰写;第5章由姚伯初、苏新撰写;第6章由吴时国、宋海斌撰写;第7章由姚伯初、吴能友、吴时国撰写;第8章由刘怀山、童思友撰写;第9章由刘学伟、姚伯初撰写;第10章由吴志强、吴时国撰写;第11章由王秀娟、徐宁、董冬冬撰写;第12章



由徐行、廖开训、刘方兰、龚跃华撰写；第13章由吴时国、徐宁、倪祥龙、郭军华撰写；第14章由吴时国、赵汗青撰写；第15章由徐宁、董冬冬撰写；第16章由杨木壮、吴能友、沙志彬、吴时国撰写；第17章由吴时国、孙运宝撰写；第18章由董冬冬、姚根顺、吴时国撰写；第19章由吴时国、王志君、李清平撰写；第20章由姚伯初、梁金强撰写；第21章由姚伯初、王宏斌撰写。全书由吴时国、姚伯初统稿。本书撰写过程中得到中国科学院资源环境科学与技术局常旭副局长、张金东学术秘书、任小波处长的鼓励和支持。本研究成果资助项目包括国家“118”水合物专项研究课题“我国海域天然气水合物成藏的地质构造条件研究”（编号：200200203-02-03）、国家“863”计划项目“水合物分解引起的海底不稳定性的模拟研究”（编号：2006AA09A209-6）、中国石油天然气集团公司中青年创新基金“海域天然气水合物的混合地球物理反演研究”（编号：W060123）、中国科学院知识创新重要方向项目“大陆坡天然气水合物形成的地质条件和成藏机理研究”（编号：KZCX3-SW-219）、“南海北部深水海域油气勘探的关键问题研究”（编号：KZCX2-YW-203）和山东省泰山学者建设工程基金项目。