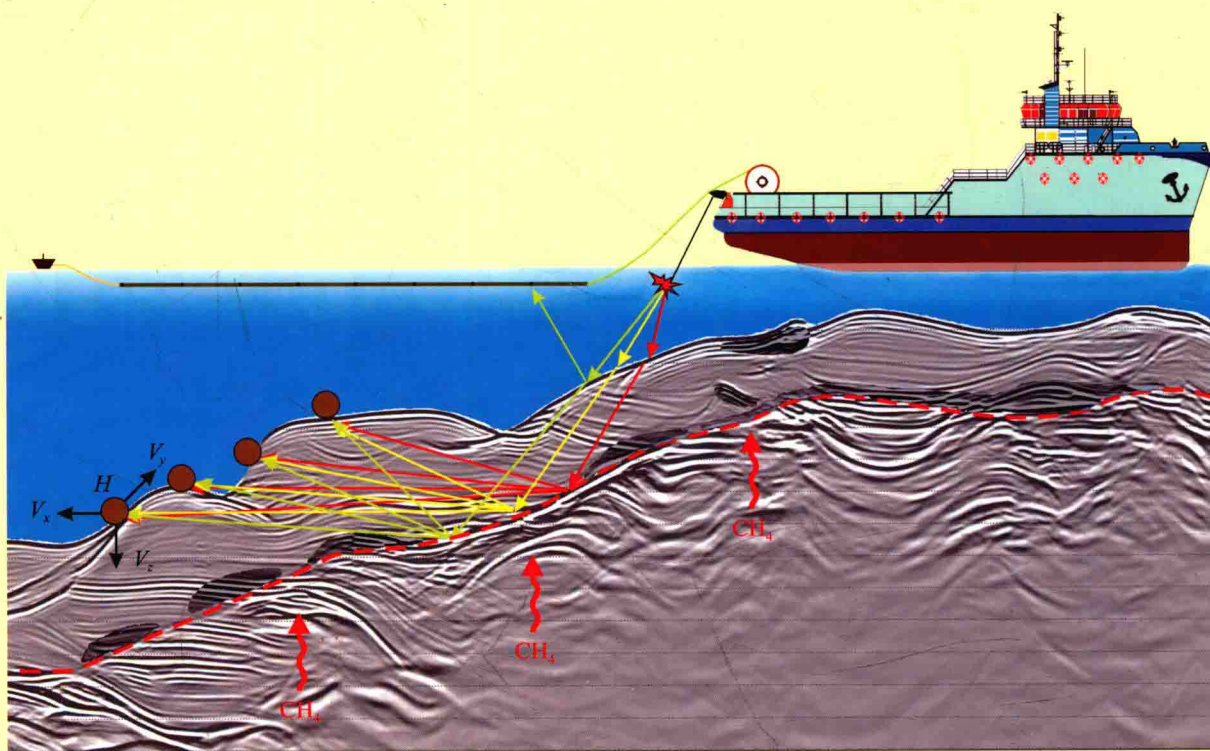


国家“863”计划
“天然气水合物矿体的三维地震与海底高频地震联合探测技术” (2006AA09A202)
“南海北部海域天然气水合物首钻目标优选关键技术” (2005AA611050)
“天然气水合物地震识别技术” (2003AA611020-02)
联合资助

海洋天然气水合物地震联合探测

张光学 梁金强 张明 徐华宁 伍忠良 等著



地质出版社

国家 003 计划

“天然气水合物矿体的三维地震与海底高频地震联合探测技术”(2006AA09A202)

“南海北部海域天然气水合物首钻目标优选关键技术”(2005AA611050)

“天然气水合物地震识别技术”(2003AA611020-02)

联合资助

海洋天然气水合物地震联合探测

耿建华	龚跃华	胡家赋	雷新华	梁蓓雯	梁 劲	著
梁金强	刘学伟	马德堂	彭朝旭	沙志彬	王明君	
王伟国	王伟巍	文鹏飞	吴能友	伍忠良	徐华宁	
杨胜雄	游庆瑜	张光学	张 明	赵庆献	郑晓东	

(按姓氏汉语拼音首字母排序)



地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书是在总结国家“863”计划“天然气水合物矿体的三维地震与海底高频地震联合探测技术”(编号:2006AA09A202)、“南海北部海域天然气水合物首钻目标优选关键技术”(编号:2005AA611050)和“天然气水合物地震识别技术”(编号:2003AA611020-02)等课题研究成果基础上撰写而成。根据发现天然气水合物地震异常、圈定天然气水合物矿体的勘探进程要求,逐步由常规地震探测发展到高精度地震探测,系统阐述三维高分辨率地震与海底高频地震(HF-OBS)联合采集、综合处理及定量评价研究的最新成果,并与国内外的相关研究进展进行对比和介绍。

本书共分7章。第1章,简要回顾天然气水合物的背景知识,综述海洋天然气水合物地震探测技术的现状及发展趋势;第2章,阐述海洋天然气水合物的常规地震探测技术;第3章,重点介绍海洋天然气水合物的高精度地震探测技术;第4章,系统阐明单源单缆三维地震探测的野外采集、数据成像及地质解释技术;第5章,主要介绍海底地震仪在海洋天然气水合物勘探中的应用;第6章,重点研讨单源单缆三维采集与HF-OBS联合采集的实现以及实例分析;第7章,重点阐述利用三维地震与海底地震仪联合探测技术进行天然气水合物矿体识别评价的实例。

本书可供从事天然气水合物地震勘探与开发的相关人员阅读,也可供大专院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

海洋天然气水合物地震联合探测 / 张光学等著. —
北京:地质出版社,2014.12
ISBN 978-7-116-09120-7

I. ①海… II. ①张… III. ①海洋-天然气水合物-
地震勘探-研究 IV. ①P618.130.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第308032号

Haiyang Tianranqi Shuihewu Dizhen Lianhe Tance

责任编辑:刘亚军 邱殿明

责任校对:王素荣

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路31号,100083

咨询电话:(010)66554642(邮购部);(010)66554622(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

传 真:(010)66554622

印 刷:北京地大天成印务有限公司

开 本:787mm×1092mm $\frac{1}{16}$

印 张:14.25

字 数:360千字

版 次:2014年12月北京第1版

印 次:2014年12月北京第1次印刷

定 价:135.00元

书 号:ISBN 978-7-116-09120-7

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

序

21 世纪是海洋开发、利用和保护的世纪，也是我国海洋事业为经济发展、推动社会进步的关键时期。人类对资源的利用和环境的关注、对全球灾害和生命起源的研究，都与海洋息息相关。尤其是在海洋资源开发利用方面，曾经定义为深海的区域已经成为我们经常涉足的场所，人类正逐步走向更深的海洋以探索尚不清楚的过去与未来，而天然气水合物正是这一研究背景下的产物。

天然气水合物被认为是 21 世纪化石燃料潜在的重要替代能源，其勘探潜力大、开发前景广阔，已引起世界各国研究者及各海洋国家的高度重视。我国海洋天然气水合物资源调查始于 1999 年，随后开展的由中国地质调查局组织实施的“我国海域天然气水合物资源调查与评价”项目开启了对这一新型资源的全方位勘探与综合研究。国家“863”计划水合物研究成果为调查提供技术支撑，获得南海水合物存在的多信息证据，并分别于 2007 年和 2013 年两次在南海北部陆坡海域成功获取天然气水合物的实物样品，标志我国在天然气水合物探测评价领域进入世界先进行列。

由于天然气水合物的存在改变沉积地层的声学属性，在海洋地震反射剖面上形成典型的似海底反射层（bottom simulating reflectors, BSR），据此预测世界海域天然气水合物的分布区域，而且地震数据已经得到测井数据和岩心资料的验证，这使得地震勘探方法成为发现海洋天然气水合物最流行、最快速和最有效的技术手段。早期水合物调查采用地震勘探方法与油气勘探基本一致，主要采用二维多道地震调查、单道地震调查等，目的是发现与天然气水合物存在相关的地震反射特征、浅层沉积特征，以及

与水合物相关的特殊地形地貌特征。我国早期的天然气水合物地震调查也是如此，但随着技术的不断发展和认识的逐步深入，国内的天然气水合物地震勘探已经逐步由二维向三维、单一纵波采集向多波联合勘探方向发展，以便更精细地描述含天然气水合物地层的地震反射特征，达到三维刻画天然气水合物矿体分布的目的。

本书正是在紧跟国际天然气水合物地震勘探研究进展，总结我国天然气水合物调查工作和已经取得成果的基础上，将天然气水合物地震数据采集、高分辨率地震数据成像、地质综合解释与识别、计算机三维可视化等不同学科技术进行有效集成，从而实现对天然气水合物空间分布的准确预测及资源量的合理定量评价。尤其是海底高频地震仪的开发研制及其与三维地震的联合采集技术的实现，使得精细刻画含天然气水合物沉积层的内部结构特征成为可能，为天然气水合物目标勘探奠定基础。

《海洋天然气水合物地震联合探测》代表了当前我国海域天然气水合物地震勘探综合研究的最新进展。本书的作者都是我国天然气水合物地震勘探和识别研究方面的早期实践和探索者，十多年来一直活跃于这一领域生产、科学研究的前沿，在天然气水合物地震勘探方法和地震识别等应用技术研究、天然气水合物成藏理论和实际应用等方面都有很高的造诣。这本专著凝聚了作者多年的勘探研究成果，相信对于世界海洋天然气水合物资源勘查和综合研究具有重要的科学价值，对我国海域天然气水合物目标地震勘探具有重要的指导和借鉴意义。

中国工程院院士



2014年10月

前言

天然气水合物是在自然条件下由天然气和水形成的冰状化合物，其能量密度高、资源潜力大，是一种洁净能源资源。作为潜在的能源和可能的温室气体的来源，天然气水合物已经为世界各国政府和科研人员所关注，并成为能源资源、地质灾害、气候变化和生命科学研究的热点问题。10多年来，我国的天然气水合物研究已经从起步阶段快速发展并步入世界领先行列。尤其是近几年，先后在南海北部陆坡钻探获取多类型天然气水合物实物样品，这是我国天然气水合物勘探研究史上的重要里程碑。

我国海域具备天然气水合物形成所需的物源、温压及地质构造矿条件。20世纪90年代中后期，本书作者因兴趣使然，开始关注海底可燃冰，在研判大量南海北部地震剖面后，找到其蛛丝马迹——似海底反射层。随后将地震方法作为天然气水合物勘探的一种重要调查手段写入“南海北部陆坡甲烷水合物资源调查与评价”项目建议书中。1998年执行“海底气体水合物资源探查关键技术”（820-探-5）科技攻关任务，探索性地开展海域天然气水合物地震探测技术研究，并就深水浅层水合物矿体目标勘探提出今后地震探测技术发展方向。自1999年开始，广州海洋地质调查局开始南海天然气水合物地震勘探和综合研究，初步科学评价研究区天然气水合物资源远景。10多年来的地震调查研究，已圈定出天然气水合物赋存有利远景区，预测南海北部陆坡区天然气水合物天然气资源量达185亿吨油当量。目前，海洋天然气水合物资源勘探及探测技术尚处于不断攻关和持续发展中。

“十五”期间，国家“863”计划设立了“天然气水合物探测技术”课题，开展了以地震数据为基础的天然气水合物地震识别

技术研究,取得了天然气水合物地震采集技术、天然气水合物地震多参数正反演技术、天然气水合物地震处理识别技术和天然气水合物资源量评估参数提取技术等一批创新性成果,解决了实际生产中的许多技术难题,填补了我国海域天然气水合物调查中的空白,推动了我国天然气水合物科学研究水平的迅速提高,整体达到国际先进水平,部分达到了国际领先水平。2002年,我国正式设立并启动“我国海域天然气水合物资源调查与评价”专项,并分别于2007年和2013年在南海北部陆坡钻探获取了天然气水合物实物样品,取得了天然气水合物勘探的战略性突破。但从地震勘探到实物发现,乃至工业试采开发这一过程中,尚有许多问题有待进一步解决。尤其是天然气水合物作为一种不均匀分布的矿体,如何确定天然气水合物矿体的空间分布?如何精细刻画矿体的内部矿层结构?只有解决这些问题,才能为精确评价矿体资源量提供准确的技术参数,提升我国天然气水合物调查的技术水平和勘探成效。

针对上述地质目的及勘探方面问题,“十五”后期及“十一五”期间,国家“863”计划先后实施了“南海北部海域天然气水合物首钻目标优选关键技术”课题和“天然气水合物矿体的三维与海底高频地震联合探测技术”课题,旨在研究天然气水合物矿体外形的三维地震探测和内部结构的海底高频地震联合探测技术,形成天然气水合物矿体的地震资料精细后处理技术和地震检测技术,开发天然气水合物矿体定量评价系统,最终集成适用我国海域特点的天然气水合物矿体的高精度探测及评价技术,并将该成果直接应用于生产,取得了显著的勘探成效,为国家海域天然气水合物勘探开发提供新的高技术支撑。本专著的研究内容正是基于上述课题的研究成果,所涉及的理论方法和应用技术都经过了实践检验,产生了较好的实践效应,具有很强的实用性。

本书由张光学组织撰写。第1、2章由张光学、徐华宁、吴

能友等撰写,第3章由伍忠良、徐华宁、杨胜雄、雷新华、梁蓓雯等撰写,第4章由徐华宁、伍忠良、张明、雷新华、彭朝旭、赵庆献、郑晓东等撰写,第5章由伍忠良、游庆瑜、文鹏飞、胡家赋、王伟巍等撰写,第6章由伍忠良、徐华宁、刘学伟、王伟国、马德堂、耿建华等撰写,第7章由梁金强、沙志彬、王明君、梁劲、龚跃华等撰写。课题研究和本书撰写期间,得到中国地质调查局、广州海洋地质调查局各级领导的重视及诸多专家的指导,同时也得到许多同仁的帮助和支持,地质出版社刘亚军编审等同志为本书的出版付出了辛勤的劳动,在此一并表示衷心感谢!特别感谢科技部中国21世纪议程管理中心资源环境处孙清研究员、向长生研究员,国土资源部高平研究员,项目总体专家组的刘保华研究员、骆宗强研究员,以及广州海洋地质调查局陈邦彦教授级高工、黄永样教授级高工等多位专家,在课题执行过程中所给予的支持、帮助及建设性意见。

多年思索与实践,梦想前行。11年前,为了让国内同行尽快了解海域天然气水合物地震勘探相关知识,在系统梳理、总结国外天然气水合物地震勘探的基础上,结合我国海域天然气水合物地震预研究,张光学等编写出版了《海域天然气水合物地震学》。11年来,我们通过探索实践,及时研发相关技术,将我国海域天然气水合物多道地震勘探,发展成为高分辨率多道地震与海底高频地震联合勘探,并成为目前天然气水合物矿体目标地震勘探的主打技术,以此发现了南海北部陆坡天然气水合物,这是对科学的有益探索。思行磨砺,方得玉成。本书将相关勘探技术总结成册,奉献给天然气水合物探测的科技爱好者。如果说能给大家带来勘探的愉悦,这就是作者的初衷和引以为自豪的天然气水合物地震勘探梦想。

目 录

1 天然气水合物概述	1
1.1 天然气水合物及其发现、研究历史	1
1.2 天然气水合物的岩石物性及声学特性	4
1.2.1 含天然气水合物地层地震反射特征	4
1.2.2 含天然气水合物地层地球物理响应	10
1.3 海洋天然气水合物地震探测技术现状及发展趋势	12
1.3.1 国内地震勘探研究进展	13
1.3.2 国外地震勘探研究进展	14
1.4 天然气水合物研究意义	16
2 海洋天然气水合物常规地震探测技术	18
2.1 海洋天然气水合物地震探测原理	18
2.2 海洋天然气水合物地震识别标志	19
2.2.1 BSR 特征	19
2.2.2 速度特征	21
2.2.3 振幅速度异常	22
2.3 海洋天然气水合物地震探测技术及应用	22
2.3.1 活动大陆边缘水合物探测方法	23
2.3.2 非活动大陆边缘水合物探测方法	27
2.3.3 我国海域天然气水合物地震探测方法	28
3 海洋天然气水合物高精度地震探测技术	36
3.1 海洋天然气水合物声波传播理论和模型	36
3.1.1 天然气水合物地震运动学研究	36
3.1.2 天然气水合物地震动力学研究	37
3.2 海洋天然气水合物高精度地震探测技术	47
3.2.1 海洋高精度地震探测技术	47
3.2.2 海洋天然气水合物高精度地震探测分辨率分析	51
3.3 海洋天然气水合物地震数据成像技术	54
3.3.1 海洋多道地震数据的特点	55
3.3.2 与采集因素相关的处理技术	56
3.3.3 噪音衰减处理技术	58
3.3.4 子波处理技术	61
3.3.5 多次波压制处理技术	63
3.3.6 高精度速度分析技术	65
3.3.7 叠前偏移处理技术	71

3.3.8 地震数据成像小结	72
4 海洋天然气水合物准三维地震探测技术	74
4.1 地震数据采集观测系统	74
4.1.1 单源单缆动态定位技术	74
4.1.2 准三维地震调查技术	77
4.1.3 面元设计	80
4.2 地震采集、数据处理技术	87
4.2.1 单源单缆准三维地震采集技术	87
4.2.2 单源单缆采集准三维地震数据成像处理技术	98
4.3 基于三维地震成像的水合物分布预测技术	106
4.3.1 扩散型天然气水合物平面分布预测	108
4.3.2 扩散型天然气水合物垂向分布预测	121
4.3.3 渗漏型天然气水合物识别及分布预测	128
5 海洋天然气水合物海底高频地震探测技术	137
5.1 海底高频地震仪性能	137
5.1.1 OBS 相关技术与发展趋势	137
5.1.2 HF-OBS 国内外相关技术现状与发展趋势	138
5.1.3 HF-OBS 主要结构与性能指标	142
5.2 海底高频地震采集、数据处理技术	145
5.2.1 海底高频地震数据采集技术	145
5.2.2 海底高频地震数据处理技术	161
6 海洋天然气水合物准三维与海底高频地震联合探测技术	174
6.1 观测系统设计	175
6.1.1 射线追踪法	175
6.1.2 基于双聚焦理论的观测系统设计	177
6.1.3 波动方程的正演模拟法 (验证)	180
6.2 海上资料采集效果	181
7 海洋天然气水合物准三维与海底高频地震联合探测应用实例	184
7.1 研究区概况	184
7.2 天然气水合物矿体综合评价	186
7.2.1 BSR 特征分析	186
7.2.2 OBS 地震成像分析	188
7.2.3 地震速度分析	192
7.2.4 水合物矿体地震属性检测	203
7.2.5 OBS 速度约束波阻抗反演	207
7.2.6 水合物资源量评估	210
参考文献	213

1 天然气水合物概述

1.1 天然气水合物及其发现、研究历史

天然气水合物是在自然条件下由天然气和水组成的冰状化合物，最常见的气体组分为甲烷，它通常赋存于高压和相对低温的海底之下和永久冻土带区域（Kvenvolden, 1993）。20 世纪初期，Hammerschmidt 发现天然气运输管道中的水合物致使管道堵塞（Hammerschmidt, 1934）。当人们意识到天然气水合物在自然状态下存在的温压控制条件后，试图获得自然状态下的水合物实物样品。在 20 世纪 60 ~ 70 年代，分别在西伯利亚和阿拉斯加的永久冻土带发现天然气水合物（Collett, 1983）；1974 年则在黑海首次取得了海洋沉积物中的天然气水合物样品（Yefermova et al, 1975），随后 ODP（大洋钻探计划）和 DSDP（深海钻探计划）在许多深水沉积物中甚至在海底表层都发现了自然状态下存在的天然气水合物，如中美洲外海和布莱克海台。

天然气水合物是没有标准化学式的复合物，其中水分子形成所谓的主体笼状结构并包含气体分子（客体分子），图 1.1 给出了水分子连接形成“笼”并捕获气体分子（如甲烷）

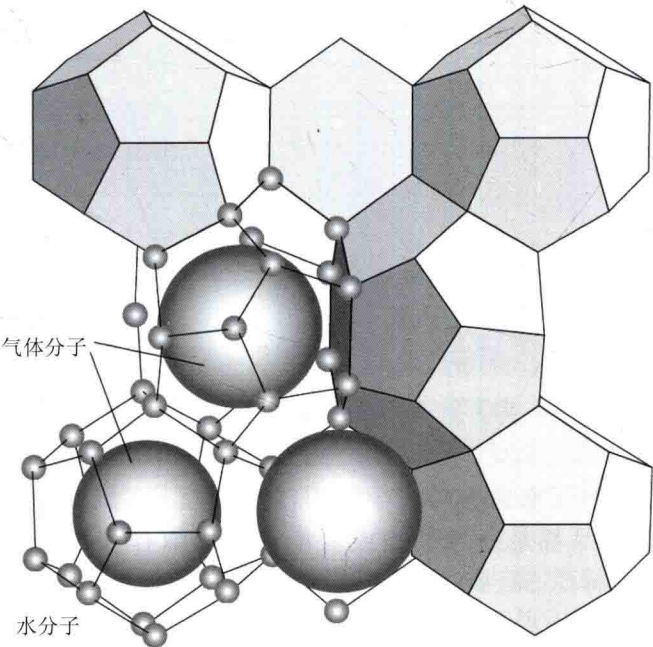


图 1.1 天然气水合物的典型结构
(据 Sloan, 1998)

形成水合物的典型结构 (Sloan, 1988)。通常, 一个天然气水合物可以在每一个单独的“笼”中包含不同类型的气体分子, 这取决于混合气体的状况。组成水合物的气体除甲烷外, 硫化氢、二氧化碳等气体也可以形成水合物, 而其他烃类气体形成水合物的情形不太常见。甲烷是自然状态下形成天然气水合物最常见的客体分子, 甲烷气体分子体积分数超过 99% 的天然气水合物通常称为甲烷水合物。

按产出环境分类, 天然气水合物可以分为海底天然气水合物和陆地冻土带天然气水合物; 如果按结构分类, 则可分为 I 型 (立方晶体结构)、II 型 (菱形晶体结构) 和 H 型 (六方晶体结构), 主要取决于客体分子的类型。I 型水合物和 II 型水合物中的客体分子主要是甲烷、乙烷、丙烷、异丁烷、二氧化碳和氮气分子, 而形成 H 型水合物的烃类具有较大的分子量。I 型水合物中的客体分子较小, 主要是生物成因的甲烷气, 也是自然界最为常见的一种天然气水合物类型。II 型水合物和 H 型水合物中的烃类主要来源于热成因, 客体分子较大, 因此相对更稳定, 通常与油气藏的渗漏有关。

天然气水合物矿藏分布于陆地的永久冻土带 (如极地和西伯利亚等) 和全球海洋的近海大陆斜坡等区域。目前已发现的水合物分布区域超过 230 处, 其中大部分都是通过似海底反射层 (Bottom Simulating Reflectors, 以下简称 BSR) 来推断的, 还有一部分已经通过取样证实, 而进行实际开采或者试开采的仅有 3 处, 如图 1.2 所示 (Kvenvolden et al, 2001)。



图 1.2 世界范围天然气水合物分布
(据 Kvenvolden et al, 2001)

海洋环境下的天然气水合物存在于 BSR 之上的沉积物中或近海底处, 大多数的天然气水合物实物样品都是通过钻探或者海底浅表取样获得 (Abegg et al, 2007; Kvenvolden, 1995)。样品一旦暴露于大气温度与压力环境下, 水合物就不再稳定并分解。对于某一给定的深度位置, 温度是由海底处的温度与地温梯度控制的, 而压力则由水深和沉积物的性质及厚度决定的, 如图 1.3 所示。固态的天然气水合物之下的游离气体被捕获形成了地震剖面上的 BSR, 但含水合物层并没有与构造对应, 这也说明温度与压力是水合

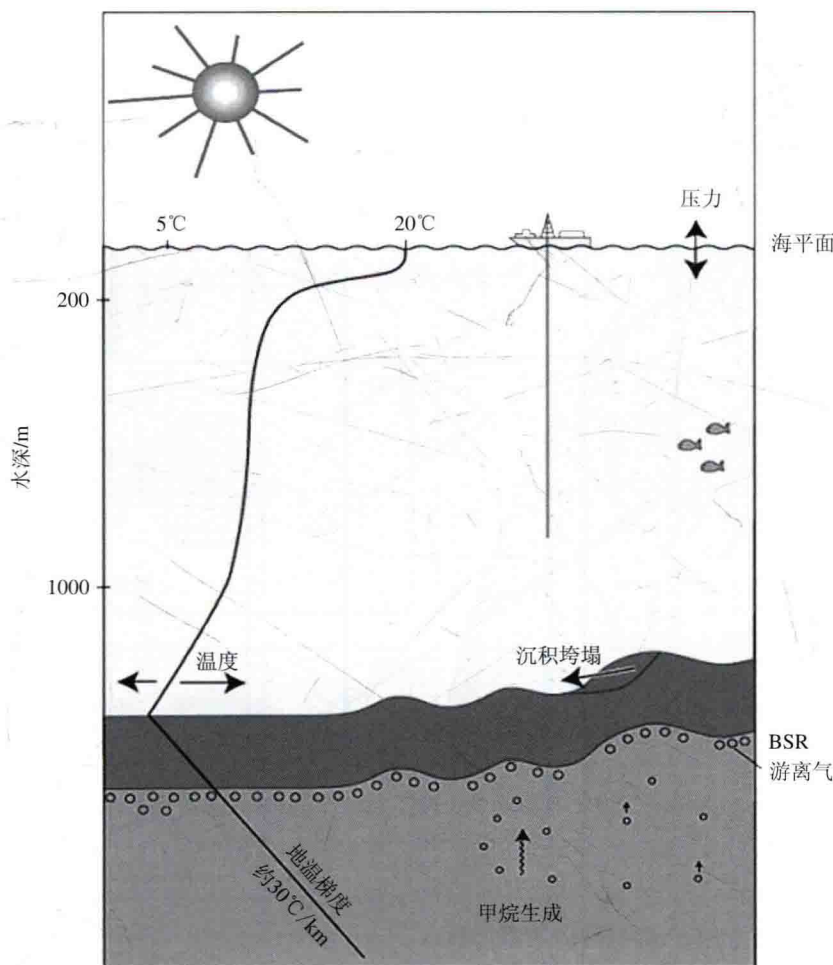


图 1.3 含天然气水合物地层的控制因素——温度与压力
(据 Abegg et al, 2007)

物层稳定存在的控制因素，它不是由岩性、构造等因素决定的。

图 1.4 为海洋沉积中天然气水合物稳定相图，给出了海洋环境中天然气水合物稳定所必需的物理条件。假定在 0°C 的情况下（如极地地区），甲烷水合物在水深 100m 的位置不可能稳定存在，但可能出现在水深超过 400m 的海底处，而水合物稳定带的厚度取决于温度梯度。随着深度上升，海底之下的温度升高致使水合物不能形成。假定平均地温梯度为 $3^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ，在水深 300m 处钻探，那么水合物的厚度理论上可以达到 300m；当水深为 1000m 时，这一厚度可以达到 600m。但是沉积地层的温度随深度的上升通常会更快一些，例如主动大陆边缘的地温梯度达到 $4 \sim 6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。因此水合物带的厚度通常比理论值要薄（Kvenvolden et al, 2001）。

除了合适的温度压力条件之外，天然气水合物的形成与稳定还依赖于有足够的游离气（主要是甲烷）。在大陆边缘，浮游生物的产量很高，以及冲积作用产生大量的有机质，构成沉积地层有利的生气基础，使得此处可利用的甲烷量较高，这也是水合物通常分布于主动和被动大陆边缘的主要原因（Dale et al, 2008）。但也有一些例外的分布区，如里海、

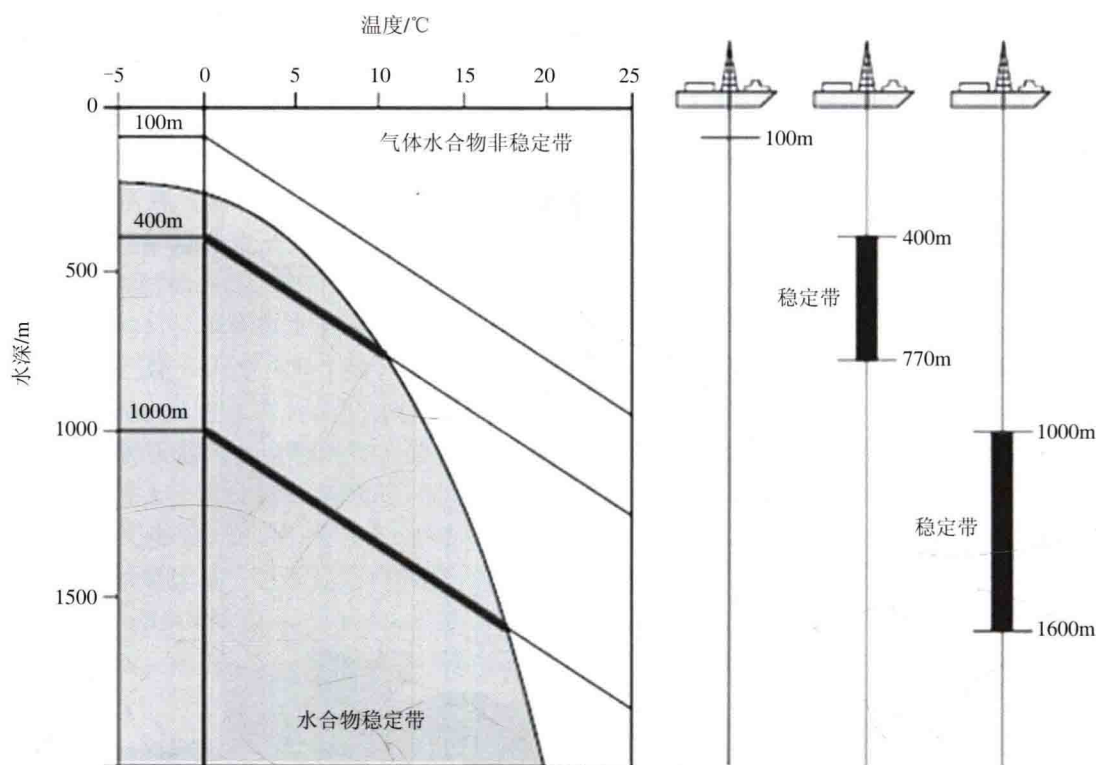


图 1.4 一定地温梯度条件下海洋天然气水合物稳定带的相图
(据 Kvenvolden et al, 2001)

黑海、地中海、康士坦茨湖和贝加尔湖等地区。

1.2 天然气水合物的岩石物性及声学特性

1.2.1 含天然气水合物地层地震反射特征

1974 年，科学家在海洋地震反射剖面上发现似海底反射层，并将这一现象归因于天然气水合物存在所致，据此在世界范围内的许多大陆斜坡发现天然气水合物。然而，近来的证据表明，BSR 并不是天然气水合物存在与否的唯一指标，而是由于水合物与游离气之间的接触形成，但在没有游离气的情况下，即便存在水合物，BSR 也可能不发育。同样的，一些斜穿地层的似海底反射也可能是成岩作用造成的，不一定与水合物相关。尽管 BSR 与水合物具有较好的关联，但二者并不是一一对应的，目前对天然气水合物的真实分布了解尚浅，仅仅利用 BSR 证据来判断大陆斜坡天然气水合物的存在是不够的，即便估算局部区域的天然气水合物资源量时也带有很大的不确定性。例如墨西哥湾，形成天然气水合物的游离气既有生物成因的，也有热成因的，甚至海底也有分布。

海洋天然气水合物主要分布于水深大于 500m 的海域，埋深不超过 1100m，因此水合

物通常存在于未固结的沉积物中。而天然气水合物与未固结沉积物之间的接触关系会显著影响其地震反射和地层速度响应，进而对天然气水合物饱和度的估算产生明显影响。根据天然气水合物颗粒与沉积物颗粒之间微结构关系，可以将二者的接触关系归纳为 6 种基本类型 (Xu et al, 2004)：①水合物胶结沉积颗粒；②水合物完全包裹沉积颗粒；③水合物在孔隙结构内部生长并与颗粒相互支撑；④水合物充填颗粒间的空隙并成为孔隙流体的一部分；⑤水合物均匀形成岩石基质，沉积物侵入这一基质中，如同永久冻土带中的冰层；⑥水合物以结核状生长或者充填于沉积层的裂缝空间。图 1.5 为天然气水合物与沉积物之间的典型接触关系示意图。

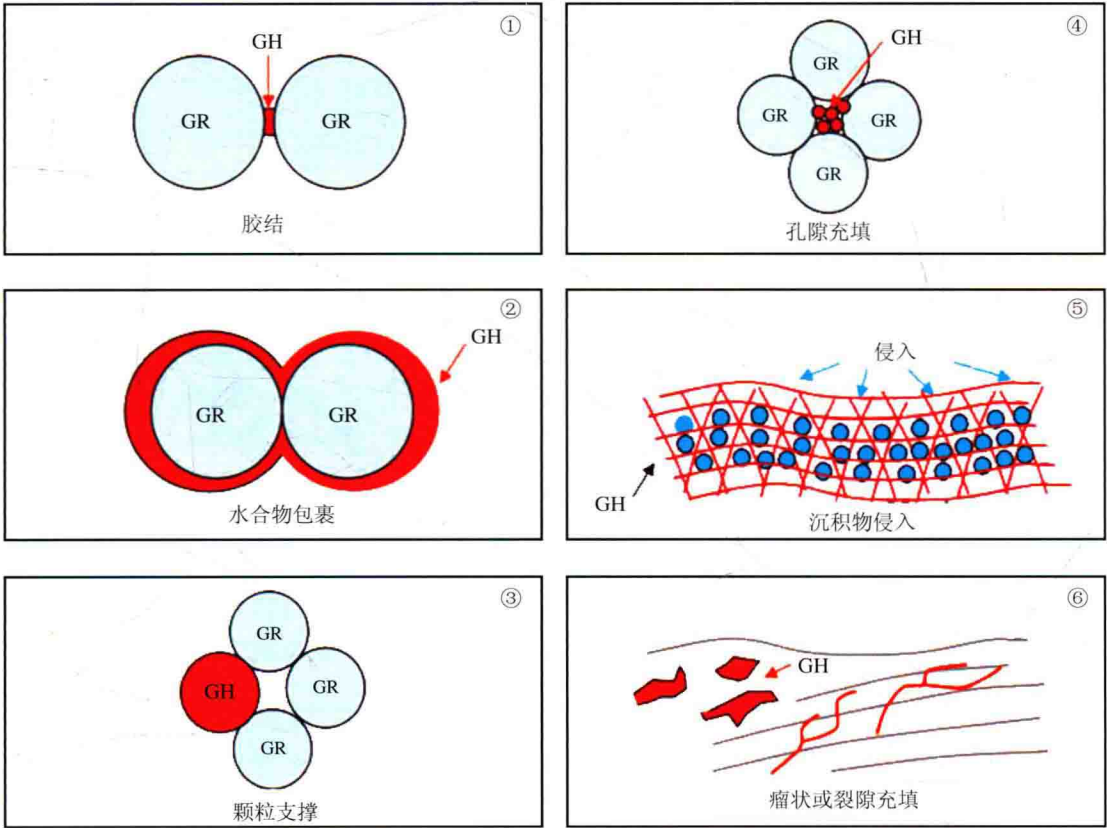


图 1.5 气体水合物与沉积物主要接触关系
(GH 表示水合物，GR 表示沉积物颗粒) (据 Xu et al, 2004)

对于不同的接触关系，含水合物沉积层的纵横波速度随水合物饱和度的变化差异明显，需要利用不同的函数关系来表达。对于第①类接触关系，天然气水合物胶结沉积物颗粒的接触面，当天然气水合物饱和度很低时地层声波速度快速上升，当达到一定的饱和度之后则缓慢上升；当水合物颗粒完全包裹沉积颗粒时，也就是第②类接触关系，而天然气水合物的饱和度又较低时，声速随饱和度上升也将上升，但是上升的幅度不如第一种类型快速；当接触关系为第③类时，沉积地层的声波速度在水合物饱和度较低时表现为缓慢上升，但达到一定的值之后将随水合物的饱和度急剧加速上升；对于孔隙充填的第④类接触关系，纵波速度只有在孔隙空间几乎被完全充填时才会有明显的变化，而横波的速度几乎不会变

化；第⑤类接触关系假定天然气水合物均匀分布于沉积物中，地层纵横波速度都会随水合物饱和度较快上升，但这类情况非常少见；钻井结果表明：第⑥类接触关系更可能出现，但由于天然气水合物是以结核状或者充填垂直裂缝的形式存在于浅部泥页岩沉积中，所以难以用一个特定的数学函数来表达地层的声波速度响应与水合物饱和度的关系。图 1.6 为不同接触关系含水合物沉积地层的声波速度随水合物饱和度的变化，它是一系列基于实测数据的经验关系式。应当指出的是，在地质背景发生变化后，由于岩性发生变化，因此经验关系式就不一定有效，但可以反映一定的变化趋势。

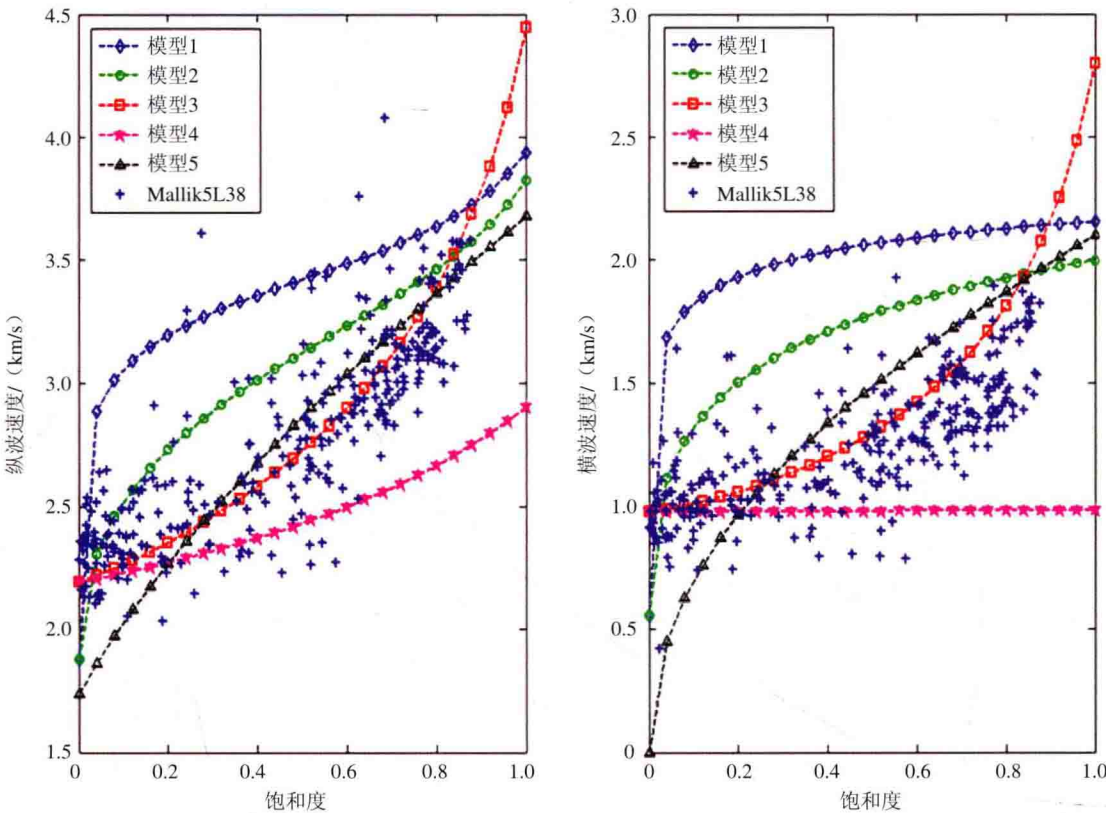


图 1.6 不同接触关系时地层声波速度（纵横波）随水合物饱和度变化
(据 Lee et al, 1996)

不论天然气水合物颗粒与沉积颗粒间的接触关系如何，对应的沉积地层声波速度，尤其是纵波速度都会随水合物饱和度的增加而上升，这也是含天然气水合物地层的最典型特征。很明显，地层的波阻抗因为含天然气水合物而明显上升，从而在地震反射剖面上形成一个强的反射。另外，水合物稳定带的主控因素为温度和压力，与岩性基本无关，因此水合物稳定区域是等温等压界面，在地震剖面上表现为一个与海底近似平行的强反射界面——BSR。目前，除已经钻探取样发现天然气水合物实物样品的海域之外，世界海域的天然气水合物的分布预测主要根据这一特殊反射确定。图 1.7 为我国海域最典型的含天然气水合物地层的地震反射剖面，发育与天然气水合物相关的各种地震反射特征，包括振幅空白、BSR 及 BSR 斜切地层等。

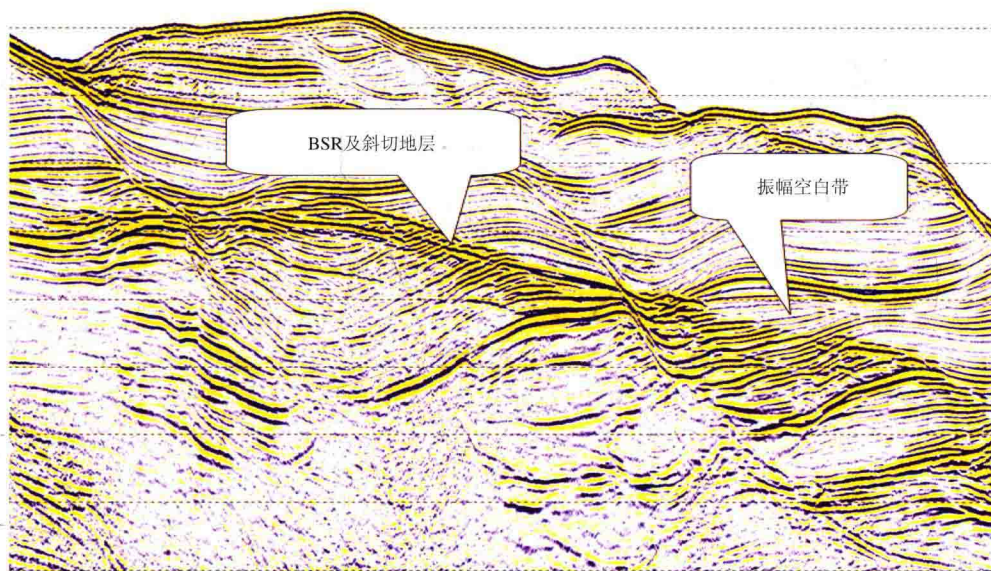


图 1.7 南中国海域典型的含水合物地层的地震反射剖面
(据徐华宁等, 2006)

BSR 本身的振幅强度与 BSR 的成因有关, 主要由其下部是否含游离气决定。如果 BSR 之下含有游离气, 也就是 BSR 由含水合物沉积物与下伏含游离气沉积物的分界引起, 那么 BSR 的强振幅特点更明显; 如果 BSR 是含水合物沉积物与一般沉积物的分界面, 那么 BSR 的振幅强度相对较小。这两种模式在世界已发现的天然气水合物地区都已经得到证实, 第一种模式强调游离气的作用, 第二种模式强调水合物的影响, 二者都说明 BSR 是水合物稳定带的底界面, 且地震波反射极性发生反转 (图 1.8)。研究区的钻探测井表明, 在已知含天然气水合物沉积层之下仅有微量的气体, 对应的声波速度也没有表现出低于背景速度的趋势, 可以推测研究区沉积层的高速异常主要是由于天然气水合物引起的。

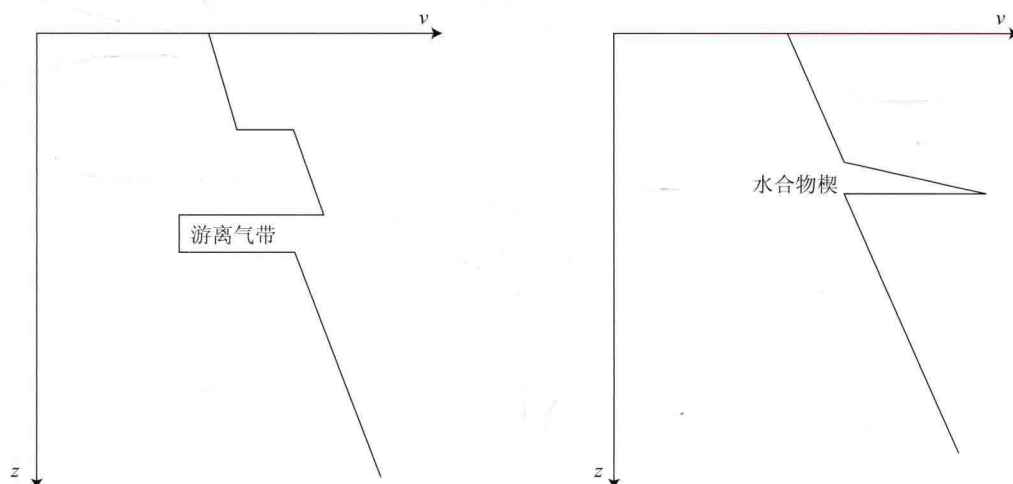


图 1.8 含水合物沉积两种不同的高速异常模式
(据 Katzman et al, 1994)