

南海北部陆坡甲烷和 天然气水合物地质

——中德合作SO-177航次成果专报

黄永样 Erwin Suess 吴能友 等著



地质出版社

南海北部陆坡甲烷和天然气水合物地质

—— 中德合作SO-177航次成果专报

黄永样 Erwin Suess 吴能友 等著

地 质 出 版 社

• 北 京 •

内 容 介 绍

本书以2004年广州海洋地质调查局和德国基尔大学Leibniz海洋科学研究所联合执行的中德合作项目《南海北部陆坡甲烷和天然气水合物分布、形成及其对环境的影响研究》SO-177航次现场调查资料为基础,详细介绍了SO-177航次的主要调查技术方法和航次所获得的重要调查成果,分析了南海北部东沙东北海域的海底地形地貌特征、海底电视观测结果、水体地球化学特征、表层沉积物特征、自生碳酸盐岩特征、海洋底栖生物特征和沉积物孔隙水地球化学特征等,讨论了研究区甲烷与天然气水合物地质之间的关系。

本书可供有关地质科研、生产和教学人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

南海北部陆坡甲烷和天然气水合物地质:中德合作SO-177航次成果专报/黄永祥等著. —北京:地质出版社, 2008.12

ISBN 978-7-116-05918-4

I. 南… II. 黄… III. ①南海-大陆坡-甲烷-石油天然气地质②南海-大陆坡-天然气水化物-石油天然气地质 IV. P618.130.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第195356号

责任编辑:曾繁彩 陈 磊

责任校对:李 玫

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路31号, 100083

电 话:(010)82324508(邮购部); (010)82324565(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010)82310759

印 刷:北京地大彩印厂

开 本:787mm×1092mm¹/₁₆

印 张:13

字 数:320千字

印 数:1—1500册

版 次:2008年12月北京第1版·第1次印刷

定 价:120.00元

书 号:ISBN 978-7-116-05918-4

审 图 号:[2008]第0606号

(如对本书有建议和意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

■ 前 言

2004年6月2日至7月14日,广州海洋地质调查局和德国基尔大学Leibniz海洋科学研究所联合执行了中德合作项目《南海北部陆坡甲烷和天然气水合物分布、形成及其对环境的影响研究》SO-177航次调查。本报告以现场调查成果为主,详细介绍了SO-177航次的主要调查技术方法和航次所获得的重要调查成果,包括海底地形地貌、海底电视观测、水体地球化学、浅表层沉积物取样、自生碳酸盐岩、海洋底栖生物、孔隙水地球化学等。航次资料的深入分析研究成果,将以论文形式公开发表。

一、航次背景

1999年以来,广州海洋地质调查局在南海北部陆坡开展了天然气水合物资源调查与评价,取得了重要进展,获得了包括地质、地球物理、地球化学、海底摄像等多信息证据,充分表明南海北部陆坡赋存有天然气水合物。但是,鉴于天然气水合物资源调查研究的复杂性,受我国现有技术方法和技术设备等因素的限制,我国海域天然气水合物调查和研究仍有很多基础性问题未能解决,天然气水合物的环境效应研究仍属空白。因此,国土资源部和中国地质调查局积极寻求开展国际合作,借鉴国际上的成功经验,利用国际先进的技术装备进行调查和地质取样,取得我国天然气水合物调查研究的实质性突破,研究天然气水合物对环境的潜在影响。

成立于1987年的德国基尔大学GEOMAR海洋地学研究中心(2004年1月改名为Leibniz海洋科学研究所,简称IFM-GEOMAR),在海洋天然气水合物的科学研究、技术装备研制、勘查经验等方面具有世界领先水平,尤其在海底浅表层天然气水合物高清晰摄像定位调查与采样、地球化学探测和地震资料特殊处理和天然气水合物识别技术等方面具有国际上独特和领先的优势,在秘鲁(Linke和Suess, 1994)、卡斯凯迪亚(Suess等, 1999; 2002)、中美洲哥斯达黎加(Bohrmann等, 2000)等活动大陆边缘的近表层天然气水合物研究取得了重大进展。该所Erwin Suess教授是目前国际上天然气水合物研究的资深专家和权威人物,曾多次担任大洋钻探计划(ODP)和天然气水合物方面的重大国际合作项目(如TECLUX、LUTOS等)的首席科学家。

2001年5月,国土资源部副部长、中国地质调查局局长寿嘉华率团赴欧洲访问期间,专程到德国基尔访问了基尔大学GEOMAR海洋地学研究中心,考察了天然气水合物的研究成果,并表达了在我国海域合作开展天然气水合物调查和研究的意向,这一动议得到了两国科学家的积极响应,得到了两国政府的支持和推进。尤其是Erwin Suess教授用了两年多的时间,在筹备、争取航次、组织各种技术设备、队伍等多方面做了大量繁重而精细的工作。

2003年1月28日~29日,Erwin Suess教授应广州海洋地质调查局黄永样总工程师的邀请,再次访问广州海洋地质调查局,双方进行了学术交流,就开展南海北部陆坡天然气水



合物合作调查研究的可能性进行了探讨。2003年2月23日, Erwin Suess教授给黄永样总工程师再次确认开展合作的诚意, 并提出了合作项目的具体计划。2003年4月, 德国基尔大学GEOMAR海洋地学研究中心与广州海洋地质调查局合作编制了《南海北部陆坡甲烷和天然气水合物分布、形成及其对环境的影响研究》中德合作项目建议书, 并提交给德国教育研究部; 同时, 广州海洋地质调查局向我国科学技术部申请的国际科技合作重点计划项目“海洋天然气水合物探测技术研究”也得到了批准, 作为中德合作项目的前期工作予以启动。2003年6月, 广州海洋地质调查局向中国地质调查局和国土资源部提交了“关于与德国基尔大学GEOMAR海洋地学研究中心开展南海北部天然气水合物合作调查研究的请示”。2003年7月~9月, 根据德国科学家对项目建议书评估提出的具体意见, 双方合作对项目建议书进行了修改, 并在2003年9月Erwin Suess教授赴青岛参加天然气水合物国际学术研讨会期间, 双方就合作项目的具体内容进行了认真的研究。2003年11月18日~30日, 广州海洋地质调查局总工程师黄永样等赴德国, 访问了“太阳号”船船东RF公司和基尔大学GEOMAR海洋地学研究中心, 实地考察了德国“太阳号”调查船, 就中德合作开展天然气水合物研究等事宜与Erwin Suess教授进行了进一步研究。2003年12月19日, 中德合作项目“南海北部陆坡甲烷和天然气水合物分布、形成及其对环境的影响研究”(简称SiGer项目)得到了德国政府的批准和资助, 由德国基尔大学Leibniz海洋科学研究所(IFM-GEOMAR)和广州海洋地质调查局(GMGS)联合实施, 起止时间为2004年至2005年, 并决定2004年6月16日至7月14日利用“太阳号(SONNE)”科考船在我国的东沙海域执行SO-177航次。2004年2月10日, 国土资源部以国土资函[2004]23号文对广州海洋地质调查局提出的中德合作项目建议进行了批复。

考虑到合作项目批准的SO-177航次时间(6月16日至7月14日)属南海台风多发季节。为了保证合作项目的顺利进行, 取得南海北部天然气水合物调查研究的突破, 征得国土资源部和中国地质调查局的批准, 广州海洋地质调查局决定在德国政府资助的航次船时以外租用“太阳号”船14天, 时间自6月2日至6月15日。因此, SO-177航次实际执行时间是6月2日至7月14日, 航次起航地点香港, 终点上海。

2004年3月10日, 广州海洋地质调查局在广州分别与德国基尔大学Leibniz海洋科学研究所和“太阳号”船船东德国RF公司签订了中德合作项目《南海北部陆坡甲烷和天然气水合物分布、形成及其对环境的影响研究》合作协议和“太阳号”船租用合同。

2004年2月, 广州海洋地质调查局根据1996年6月18日国务院第199号《中华人民共和国涉外海洋科学研究管理规定》和国海外发[1999]554文精神, 以广海地调函[2004]3号文向国家海洋管理机构国家海洋局报送了《涉外海洋科学研究项目申请书》和《涉外海洋科学研究项目海上船只活动计划申请书》。2004年4月16日, 中德合作项目及其船只活动计划得到了国家海洋局会同外交部、总参等部门的审批, 国家海洋局涉外函字[2004]21号文批复了项目申请和船只活动计划申请, SO-177航次才得以最终开展。

二、航次目标与任务

天然气水合物(gas hydrate)是在低温、高压条件下, 由天然气与水分子结合形成的外

观似冰的白色固态结晶物质，被形象地称为“可燃冰”。因其成分的80%~99.9%为甲烷，又被称为“甲烷水合物”。通常赋存于陆地永久冻土带中和水深400m~3000m深的海底沉积物中。全球海洋60%的海域具备天然气水合物的赋存条件，现在全球海洋10%以上的区域已发现了天然气水合物矿藏。

资源和环境是人类社会赖以发展的重要基础。天然气水合物是人类最有希望的新的天然气替代能源；同时海底天然气水合物的分解，尤其是大面积的分解与全球变暖和海底滑坡等一系列环境变化和海洋地质灾害密切相关，因此，天然气水合物具有巨大的能源意义和环境效应。世界上许多国家都十分重视对天然气水合物资源和环境双重方面的研究。

中德合作“南海北部陆坡甲烷和天然气水合物分布、形成及其对环境的影响研究”项目的总体目标是研究南海北部陆坡甲烷的循环、释放甲烷的冷泉的特点和评估天然气水合物在南海甲烷中所起的潜在作用。

南海北部是被动大陆边缘，覆盖着巨厚的、富含有机质的沉积地层。中、德双方科学家拟采用综合手段对甲烷循环进行多方面研究。地质成因的甲烷作为一个长期被忽略的“温室效应”驱动因子，近来越来越多地引起了人们的关注，而成为许多国际和国家计划的研究焦点。SO-177航次主要调查冷泉的地质、地球化学和水化学，并辅以记录海面甲烷和烃类的释放情况。调查成果将在项目的下阶段拓展为定量研究甲烷的释放/甲烷的循环周期。除广州海洋地质调查局对所选区块所作过的各项详细研究外，SO-177航次在该区首次使用海底电视观测（OFOS）和电视取样（电视抓斗TV-G、电视多管取样TVG-MUC）进行调查，以研究自生碳酸盐岩所指示的冷泉的活动状况，发现新的冷泉位置及构造和沉积环境对其所起的作用。

与甲烷相关的自生碳酸盐岩被认为是冷泉长期活动的结果。在本项目中，我们分析自生碳酸盐岩，并开展孔隙水组成、沉积物表层的生物地球化学作用研究。此外，辅助检测从海底释放到水体中的甲烷及甲烷与大气之间的交换。为此，SO-177航次运用 CH_4 - CO_2 平衡系统连续记录气体分压，以期海水表面甲烷和二氧化碳的证据可以反映海底冷泉活动积累的情况。

SO-177航次的目标为：①拓展我们对冷泉和天然气水合物在全球分布的认知；②确定冷泉和天然气水合物在边缘海中的特征；③采集天然气水合物样品分析其化学组成和结构；④研究与甲烷相关的生物群和与甲烷有关的自生碳酸盐岩的特征；⑤确定冷泉、自生碳酸盐岩和浅表层天然气水合物的分布；⑥为南海甲烷气体的自然释放并进入大气提供证据。

SO-177航次的任务为：①利用国际先进水平的高精度多波束测深系统，探测海底冷泉和浅表层天然气水合物可能赋存的位置；②运用先进的海底电视观测系统（OFOS）进行海底实时观察，调查海底底质、冷泉碳酸盐岩和冷泉生物群的分布特征；③利用 CH_4 - CO_2 平衡系统对表层海水游离甲烷和二氧化碳连续进行监测，检测海面甲烷和烃类的释放情况；④利用电视多管取样、电视抓斗取样、重力取样和保压取样等多种先进海底取样技术，在现场对沉积物孔隙水进行地球化学测试，追踪甲烷的释放和通量；⑤利用现场检测水体中的甲烷异常，定位海底甲烷释放羽状流的位置。



三、国内外研究现状

作为资源而言,天然气水合物具有能量密度高、埋藏浅、成藏物化条件好、清洁环保等特点,被认为是未来石油、天然气的替代能源之一,是维持整个人类社会可持续发展的潜在能源。据保守估算,全球天然气水合物所含天然气的总资源量相当于全球已知化石燃料(煤、石油和天然气)总热当量的2倍,可满足人类未来1000年的能源需求,是地球上尚未开发的最大未知能源库。

然而,天然气水合物也具有显著的环境效应。业已证明,大陆边缘海洋沉积物中天然气水合物的形成和分解是一种动态过程(Judd et al., 2002)。作为一种低温、高压状态下稳定的物质,天然气水合物往往同自然环境条件处于十分敏感的平衡之中,环境变化时往往会导致天然气水合物分解,释放甲烷气体,从而产生环境效应。

甲烷是一种温室效应远大于二氧化碳的温室气体,在全球气候变化中扮演着重要角色。海洋沉积物中的甲烷含量高于大气圈中甲烷含量的3000倍。大气中的甲烷除了部分来自人为源(如农业、废弃物等)外,还有相当一部分来自于自然作用,其中从边缘海沉积物中释放的甲烷也占了相当大的比重。据估计,边缘海可能每年向大气释放14Tg~38Tg的甲烷,占了总甲烷来源的4%或占大气中自然甲烷来源的15%(Judd et al., 2002)。

天然气水合物分解和甲烷气体释放引起海底的麻坑、冷泉喷口、冷泉生物群、自生碳酸盐岩和化学礁以及水体中可探测到的从海底溢出的甲烷声学羽状流等在全球范围内普遍存在,它们都是与海底甲烷的“源”与“汇”有关的具体表征,关系到全球甲烷的释放和消耗。但是由于海底冷泉的首次发现至今还只有短短的20年时间,最近10年来在世界各海域不断有所发现才引起较普遍的关注,因此关于甲烷在全球气候变化中的作用还未能被正确认识,Judd等指出,“负责咨询和政策制定的国际组织在认识地质来源的甲烷对全球气候变化的意义方面是失败的”。这种论述充分地得到了Dickens(1999)提出的新的全球碳循环概念的支持。很显然,气候变化国际政府小组提出的全球气候变化预测模型缺乏地质来源甲烷的影响因素(IPCC 2002; Houghton et al., 1996; Norris and Röhl, 1999),忽视了海底生物对全球甲烷输送到水圈和大气圈的作用(Boetius and Suess, 2003)。

古新世末期海洋中层生物的绝灭事件是天然气水合物环境效应的一个有力证据。随着古新世长期的岩浆活动和大气二氧化碳增加,使地球变暖,全球海水温度上升了6℃~7℃,海洋中天然气水合物总量的10%产生分解,生成的甲烷消耗了海洋中的溶解氧,使海洋成为贫氧的还原环境,大气中的甲烷浓度上升,加强了温室效应,地球进一步加速变暖,产生海洋中深层有孔虫大量的绝灭。

近年来,通过自生碳酸盐岩和冷泉生物群研究天然气水合物的环境效应在活动大陆边缘取得了丰硕成果。

在活动大陆边缘,板块俯冲作用所导致的沉积物压实和脱水作用能使半深海沉积物的体积减小20%~40%(Saito and Goldberg, 2001),大量热成因或生物成因的甲烷伴随着沉积物脱水所排出的低温流体通过断裂构造或高孔隙度的沉积层理从海底深部往上运移,在一定的温度和压力条件下,部分甲烷以天然气水合物形式赋存在沉积物中

(Kvenvolden, 1993; Suess et al., 2001), 另有部分在海底的浅表层通过细菌对甲烷的厌氧氧化作用(AOM)转化形成自生碳酸盐矿物沉淀下来(Ritger et al., 1987; Greinert et al., 2001), 剩余部分则通过喷口释放到水体并最终进入到大气(Kulm et al., 1986; Moore and Vrolijk, 1992; Sample and Reid, 1998; Suess, 2002a, 2002b)。目前的关键科学问题是海底甲烷分别进入这三种归宿的相对比例有多少?它们是如何随时间变化的?又是如何与气候与环境变化耦合的?海底化学能异氧生物群在调控甲烷进入水圈和大气圈起到了多大的作用?

20世纪90年代中期, Suess et al. (1985)在美国俄勒冈岸外水合物脊首次发现了与冷泉有关的自生碳酸盐岩和化学能生物群落, 接着全球范围内的活动大陆边缘如卡斯卡底亚俯冲带、日本南海海槽、秘鲁海沟、南巴巴多斯岛增生楔、哥斯达黎加边缘海、东阿留申俯冲带、莫兰克增生楔、中班达岛弧和地中海海脊等相继发现了这种以广泛的结核状、结壳状或管状自生碳酸盐岩和典型的化学能生物群落(双壳类生物和管状蠕虫类及厌氧菌席)为特征的冷泉喷口系统(Kulm et al., 1986; Le Pichon et al., 1987; Le Pichon et al., 1992; Ohta and Laubier, 1987; Bohrmann et al., 1998; Greinert et al., 2001)。喷口系统的存在对元素的收支、物质的周转周期以及增生楔的热结构起重要影响作用, 被认为是海洋地球科学及海洋科学里最重要的地质过程。在这个系统中, 天然气水合物的形成与自生碳酸盐岩的沉淀起到了清除甲烷的作用, 是甲烷的“汇”。其中天然气水合物这个“汇”是动态的, 因为它是气候与压力敏感资源, 全球气候变化所引起的海底温压条件的变化、地震所诱发的海底滑坡等都有可能使它失稳, 导致甲烷等温室气体的大量释放(也因为这个原因, 更古老的地质记录里, 由于所经历的频繁地壳运动几乎不可能有天然气水合物保存)。已有证据表明活动大陆边缘天然气水合物释放的甲烷能够引起万年或千年尺度的气候变化, 如早侏罗世、晚侏罗世和古新世的气候异常被认为是由于海底天然气水合物的大规模分解释放出巨量的甲烷而诱发了全球尺度的气候变暖和海洋重组所造成的(Hesselbo et al., 2000; Padden et al., 2001; Kennett et al., 2000; Dickens et al., 1995; Koch et al., 1992)。而自生碳酸盐岩的形成是由一种微生物集合体的厌氧氧化作用所驱动(Boetius et al., 2000), 这种微生物集合体能同时氧化甲烷和还原硫酸盐, 所形成的碳酸盐岩 $\delta^{13}\text{C}$ 很轻, 一般小于 -20‰ 或低至 -55‰ (Stakes et al., 1999; Peckmann et al., 2002; Cavagna et al., 1999; Kauffman et al., 1996)。海底游离甲烷气、溶解甲烷气或由于天然气水合物分解释放的甲烷成为微生物取之不竭的“源”, 由甲烷厌氧氧化作用形成的碳酸盐岩成为甲烷永久的“汇”, 使得甲烷不断地被从流体系统里清除出去。近年来, 韩喜球等利用德国“RV METEOR”54航次和“RV SONNE”174航次, 在中美洲边缘海和墨西哥湾分别取得了大量的自生碳酸盐岩样品, 通过对中美洲边缘海自生碳酸盐岩的岩石学、矿物学和同位素地球化学记录的详细研究, 发现喷口附近存在5种类型的自生碳酸盐岩, 它们的形成全部由细菌对甲烷的厌氧氧化作用所驱动, 具有碳同位素严重亏损的特点。通过同位素示踪, 发现了两种甲烷来源(深部热成因甲烷和浅部生物成因甲烷), 3种流体来源(粘土脱水、天然气水合物分解释放和海水), 有些碳酸盐岩直接形成于下伏天然气水合物释放出的流体, 由于碳酸盐岩矿物的沉淀影响了沉积物的孔隙度, 使得上升的深部流体被越来越多的下渗海水所调和, 导致了流体的氧同位素组成随着时间有偏轻的现象(Han et al., 2003; Han et



al., 2004)。Aharon et al. (1997) 对墨西哥湾的喷口碳酸盐岩U/Th测年研究表明那里的碳酸盐岩主要形成于195ka以来。Teicher et al. (2003) 对大西洋天然气水合物脊的碳酸盐化学礁的铀系测年研究, 发现文石的沉淀期次与全球海平面升降有密切关系。Torres et al. (2003) 实测了卡斯卡底亚天然气水合物脊富甲烷流体上升的速度和通量, 发现一直径约1cm的喷口, 甲烷气体上升的速度可高达1m/s, 每分钟可释放出5L气体。在大片菌席生长的地方, 富含甲烷的流体则往往呈面状外渗, 流体的上升速度为30cm/a ~ 100cm/a, 甲烷通量为30mmol/m²·d ~ 90mmol/m²·d, 菌席外围往往有大量的双壳类等生物生长, 其甲烷的通量一般小于1mmol/m²·d, 那里下渗的海水多于外溢的流体。

至今世界范围内的多数边缘海均已陆续发现了天然气水合物和冷泉喷口系统, 对全球的天然气水合物储藏量有了初步的估计, 并对部分地区富含甲烷的流体上升速率和通量通过实测或模拟也有所了解, 但是对从海底逃逸出的富含甲烷的流体总量、流体通量与成分随时间变化的状况、流体驱动力等的了解还远远不够, 人们至今不清楚全球到底有多少甲烷碳被转化成碳酸盐岩封存起来, 以及海底特殊的化学能异氧生物群落在转化甲烷并调节全球气候时所起的作用。

冷泉生物群落于1994年首次在墨西哥湾被发现 (Carney, 1994)。这是继1977年海底热液活动区黑烟囱热泉生物发现后的海底生物重大发现。近十年来, 国际上对冷泉生物的研究主要集中在不断有新的地区发现冷泉生物, 以及这些不同构造或地质背景下的生物组合的类别、生态特点和不同流体的活动关系 (Sibuet and Olu, 1998)。目前的研究表明, 在海底天然气水合物区域也分布有特殊的冷泉生物群落, 包括分解沉积物中有机质提供生物成气的微生物、氧化甲烷的微生物和依靠这些微生物提供生物合成营养的大生物如蠕虫、双壳类等。这些生物形成了一种特殊的以甲烷天然气为源的利用生物化学合成获取营养的生物组合和低温高压极端生物生态体系 (Elvert et al., 2002)。因此, 这些生物也被利用来作为识别海底浅表天然气水合物存在的微地貌标志 (苏新, 2000)。

我国对这方面的研究工作还正处在起步阶段。近年来, 广州海洋地质调查局在南海北部陆坡开展了天然气水合物资源的调查和研究, 证实南海北部陆坡具有良好的天然气水合物形成的条件和资源远景。2002年~2003年, 广州海洋地质调查局“海洋四号”船在南海北部陆坡发现存在冷泉自生碳酸盐岩结壳、菌席和喷口生物以及孔隙水甲烷和氯度含量异常等特征。自生碳酸盐岩样品的碳同位素数据分析表明, 它形成于甲烷的厌氧氧化作用, 指示南海存在通过喷口自然释放的生物成因甲烷, 但对甲烷的“源”与“汇”及其分布情况至今还不清楚, 对南海北部天然气水合物的环境影响研究尚未涉及。

四、航次开展与航次报告编写

2004年6月2日至7月14日, 中德合作联合执行了“太阳号”船SO-177航次, 首席科学家分别是德国基尔大学Leibniz海洋科学研究所Erwin Suess教授和广州海洋地质调查局总工程师黄永祥教授, 首席科学家助理吴能友教授。

航次期间, 两国科学家混合编为多波束水深测量和沉积地层浅层剖面调查、水体地球化学调查、海底电视观测、沉积物取样、沉积学、孔隙水地球化学测试分析等6个工作小

组，为了共同的科学理想，在台风频繁、海况复杂的条件下，携手合作，努力工作，取得了一批重大发现和成果。

根据航次现场调查研究和分析测试结果，两国科学家合作编制了中、英文航次报告。英文版于2005年在德国出版，现将中文航次报告在成果验收后，经重新修改出版。编写分工如下：

前言：黄永样、Erwin Suess、张洪涛；

第一章：吴能友、Erwin Suess、黄永样；

第二章：张光学；

第三章第一节：吴能友，第二节：吴能友、余平、陶军、付少英、陈道华、张海啟；

第四章第一节：余平、吴能友、肖波，第二节：陶军、吴能友、温明明，第三节：陈道华、吴能友、杨兢红，第四节：苏新、于兴河，第五节：韩喜球、方银霞，第六节：苏新，第七节：付少英、祝有海、龚建明；结论与建议：黄永样、张洪涛、吴能友。

最后报告由黄永样、吴能友统稿。

由于本报告以现场调查成果为主，详细介绍了SO-177航次的主要调查技术方法和航次所获得的重要调查成果，航次资料的深入分析研究成果，将以论文形式公开发表，因此，报告肯定存在不少不尽人意的地方，请读者批评指正。



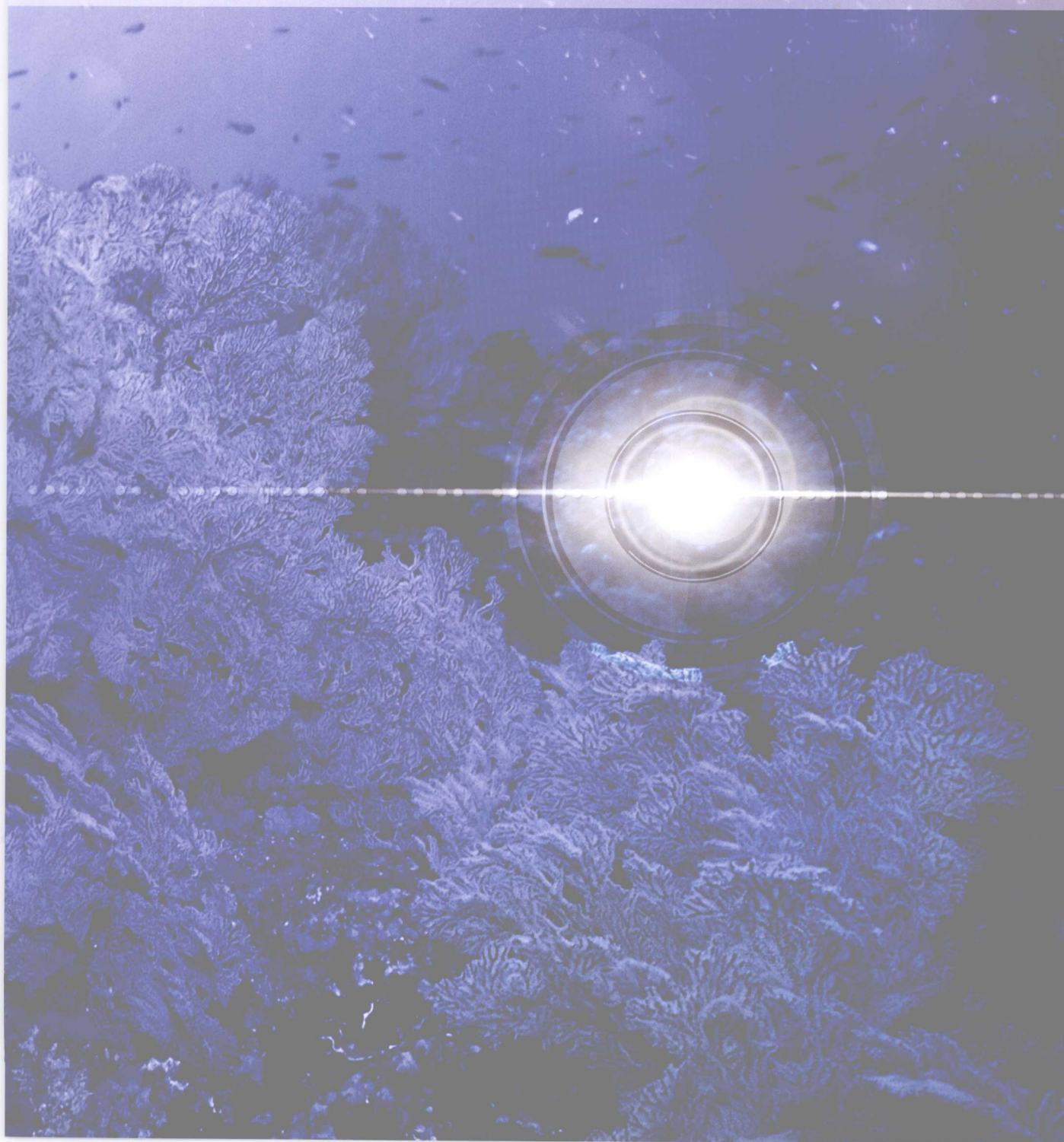
目 次

前言

第一章 航次概况.....	1
第一节 调查区及其选择依据.....	2
第二节 航次实施.....	4
第三节 任务完成情况.....	12
第二章 自然地理和区域地质背景.....	19
第一节 地理概况.....	20
第二节 海洋水文气象.....	22
第三节 区域地质背景.....	23
第四节 天然气水合物成矿条件.....	25
第三章 调查船和调查技术方法.....	30
第一节 调查船概况.....	31
第二节 调查技术方法.....	32
第四章 航次调查成果.....	47
第一节 海底地形地貌特征.....	48
第二节 海底电视观测结果.....	51
第三节 水体地球化学特征.....	82
第四节 浅表层沉积物特征.....	86
第五节 自生碳酸盐岩特征.....	101
第六节 海洋底栖生物特征.....	108
第七节 孔隙水地球化学特征.....	131
结论与建议.....	148
致谢.....	149
附表1: SO-177航次水体地球化学的分析结果.....	150
附表2: SO-177航次现场测试孔隙水离子组成和沉积物中甲烷浓度.....	165
参考文献.....	192

第一章

航次概况





第一节 调查区及其选择依据

一、调查区

SO-177航次调查区位于南海北部东沙海域和西沙海槽（图1-1-1）。东沙海域A区为主要调查目标区，西沙海槽B区为台风期间备选调查区域。调查区地理位置坐标如下：

区域A	区域B（备选）
22°15' N, 118°20' E	18°30.0' N, 111°31.5' E
22°15' N, 119°30' E	18°46.5' N, 112°50.3' E
21°00' N, 119°30' E	17°12.2' N, 113°50.5' E
21°00' N, 118°20' E	17°12.2' N, 112°20.4' E

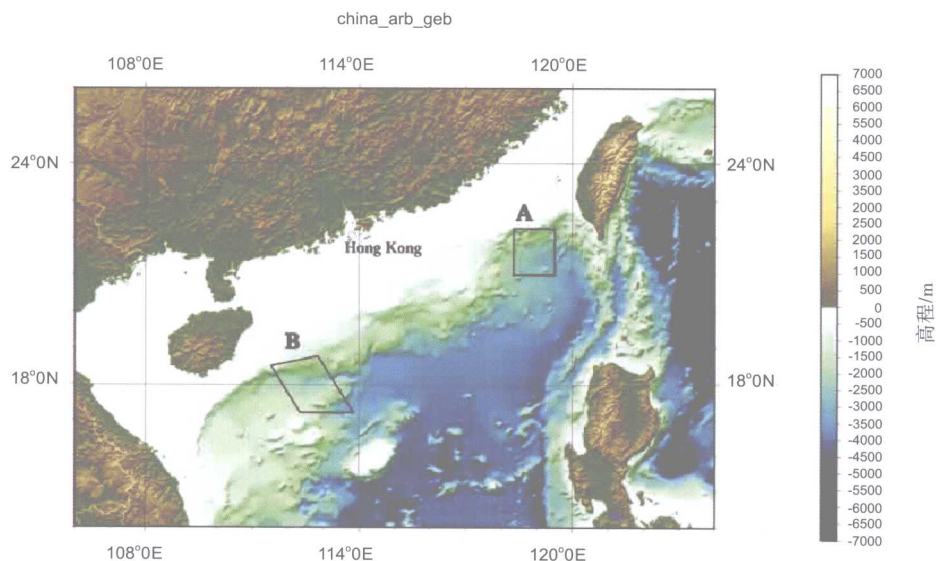


图1-1-1 SO-177航次调查区域位置图
东沙海域A区为主要目标区，西沙海槽B区为备选区域

二、调查区选择依据及航次工作基础

调查区选择主要依据广州海洋地质调查局近年来南部北部天然气水合物调查研究的成果。南海北部陆坡天然气水合物调查始于1999年。在1999年至2000年前期调查的基础上，

广州海洋地质调查局于2001年~2003年共进行了五个航次的天然气水合物地质、地球物理和地球化学调查,获得了与天然气水合物存在有关的地质、地球物理、地球化学、海底摄像等多信息证据,充分表明南海北部陆坡赋存有天然气水合物。这些调查研究成果为中德合作项目的开展和SO-177航次的执行打下了良好基础。

东沙海域A区是南海北部陆坡天然气水合物调查的重点区域。“奋斗五号”船于2001年在东沙海域进行了高分辨率多道地震调查,发现了似海底反射BSR(图1-1-2)。2002年~2003年,“海洋四号”船和“奋斗五号”船执行了东沙海域天然气水合物地质、地球物理和地球化学综合调查,进一步发现了与天然气水合物存在有关的地质、地球化学异常证据,指示天然气水合物的存在。

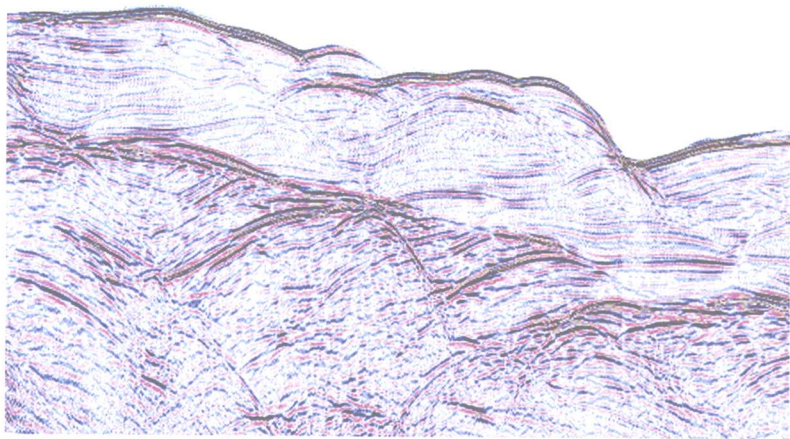


图1-1-2 显示BSR特征的东沙海域高分辨率多道地震剖面

综合地质、地球物理和地球化学资料分析认为,本区最有可能存在天然气水合物的区域位于调查区南部和北部。综合异常特征如下:

(1) 具有清晰的BSR显示和相关的地震异常,BSR分布较浅,BSR附近有明显的断裂穿至海底。

BSR具有4个明显特征:①与海底大致平行;②上覆地层出现明显弱或振幅空白区带;③BSR波形极性与海底反射波极性相反;④BSR上下地层层速度出现倒转现象(图1-1-2)。BSR主要分布于调查区东部和西南部一带,大多处于600m~2200m的水深范围。根据振幅空白带或弱振幅的发育情况,推测含水合物层的厚度为26m~149m。在HD-83站位(水深约3350m)发现海底断层,海底摄像可直接观察到海底断壁、断块等断层活动遗留的地貌特征,海底断层可能导致深部天然气水合物分解,同时也是天然气水合物分解后甲烷气溢出海底表层的通道,从而使该区出现烃类气体含量异常高值;在南部东沙海谷开展单道地震调查发现了沉积层有明显错位的现象,海底摄像发现断层陡坎,拖网获得深部老岩块,这些迹象揭示该海域具有形成冷泉的构造条件。



(2) 具有明显的地质、地球化学异常。HD-85站位取心管发生负压变形, 岩心出现“粥状”液化现象, 沉积物组分中含有重晶石和黄铁矿等自生矿物; HD-83站位表层沉积物中具有自生碳酸盐结块; HD-86站位海底摄像在水深3000m下陆坡海底获得了银白色斑块状物质影像及伴生的双壳类生物影像记录(图1-1-3)。斑块状沉积物强光下呈白色, 弱光下呈浅蓝或荧光色, 斑块大小 $10 \times 10 \text{ cm}^2 \sim 50 \times 50 \text{ cm}^2$, 双壳类生物呈白色, 大小一般在 $3 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ 。根据影像记录特征, 结合该海域的地质、地球物理、地球化学异常综合解释结果, 并与美国俄勒冈外水合物脊海底天然气水合物露头照片对比, 认为银白色斑块状物质可能是菌席, 是深部地层中天然气水合物分解后, 甲烷气沿断裂喷溢至海底后形成的天然气水合物或与其相关的标志物质, 伴生的存活双壳类动物是海底甲烷气喷溢口附近的特殊生物群落(“双壳+菌席”)。

沉积物热释光主峰峰值强度和总强度具有区域性的高值, 表明该区域具有形成天然气水合物的气源条件。整个区域具有较低的氧化还原电位。沉积物孔隙水的 Cl^- 浓度向深部降低, D 、 ^{18}O 自海底向下随深度增加而升高, SO_4^{2-} 浓度随深度增加而迅速降低, 硫酸盐-甲烷还原界面(SMI)较浅($\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ 比值在约10mbsf^①降低为0); 孔隙水 Ca^{2+} 浓度随深度显著降低(在约8mbsf降低到0); $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 与 $\text{Sr}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ 的比值随深度增加而显著增加。表层及浅层(海底3m以上)沉积物中具有非常高的烃类气体异常, 甲烷气体最高含量为 $7468.66 \mu\text{L}/\text{kg}$ (HD-196A-8/8), 平均值为 $137.23 \mu\text{L}/\text{kg}$ 。

地质、地球化学异常分布范围与BSR和相关地震异常分布范围基本吻合。综合分析研究认为, 东沙海域A区极有可能存在浅表层天然气水合物, 作为本航次调查目标区。



图1-1-3 海底银白色斑块状物质影像和贝壳生物照片

第二节 航次实施

一、航段划分和航次过程

SO-177航次自2004年6月2日香港起航, 至7月13日停靠上海, 历时42天。分两个航段执行: SO-177/1航段自6月2日至6月22日, 历时21天, 主要在东沙海域A区开展调查; SO-177/2航段自6月23日至7月13日, 历时21天, 主要在A区和B区开展调查。

SO-177/1航段: 6月2日双方科学家上船, 6月3日~4日主要进行了实验室和取样设备的

① mbsf-meter below seafloor 英文的缩写, 意为海底之下深度, 单位m。

安装调试, 6月4日下午16:00“太阳号”船正式离开香港赴工区作业, 航渡过程中召开了科学家航次协调会并进行了安全教育; 6月5日下午到达A区西北角开始作业; 6月8日~9日, 第4号台风“昆崙”经过工区东部附近, 对调查造成一定的影响, “太阳号”船赴东沙群岛附近海域避台风; 6月9日下午16:00结束避台风返回A区作业; 6月21日结束调查工作返回香港; 6月22日下午3点达到香港。整个航段, 开展安全演习2次。

在航渡避台风过程中, 于6月9日开展了学术交流, 分别由黄永样、吴能友、Anton Eisenhauer和韩喜球做了4个学术报告:

黄永样: 南海北部陆坡天然气水合物调查研究进展

吴能友: 南海新生代构造演化

Anton Eisenhauer: 冷泉环境自生碳酸盐岩的地球化学特征和生长速率

韩喜球: 中美洲哥斯达黎加大陆边缘自生碳酸盐岩研究

SO-177/2航段: 6月23日, 交换科学家和船舶补给, 国家海监总队南海支队两名执法人员登船检查, 对调查活动、仪器设备和人员情况进行了检查; 6月23日下午, 德国驻香港领事馆Jurgen Borsch领事上船参观, 并听取了首席科学家Erwin Suess教授对第一航段成果的汇报; 6月24日船离开香港, 赴工区作业, 途中召开了科学家航次协调会和安全教育会; 6月29日, 由于“民都洛”台风影响调查区域, 无法正常作业, 船离开A区赴B区工作; 7月1日到达B区, 进行了CTD、海底观测等调查, 未能有重要发现; 7月2日, 台风减弱, 船离开B区重返回A区调查; 7月4日~10日继续在A区开展调查; 7月10日下午2点结束全部调查活动, 开赴上海; 7月11日~13日航渡上海, 于7月13日上午7点达到锚地, 下午2点达到上海, 停靠上海港高阳国际客运码头。整个航段, 开展安全演习1次。

在返回A区的路途中, 于7月3日开展了学术交流, 分别由张洪涛、于兴河、苏新、Fritz Abegg、Olaf Pfannkuche、Katja Heeschen和Jürgen Hohnberg做了6个学术报告:

张洪涛: 中国区域地质填图和中国地质调查局的作用

于兴河: 南海北部陆坡中新世以来的地震相和沉积相分布

苏新: ODP204航次水合物脊沉积物粒度变化与天然气水合物分布的关系研究

Fritz Abegg: 天然气水合物内部结构研究

Olaf Pfannkuche: 海底长期观测技术

Katja Heeschen和Jürgen Hohnberg: 天然气水合物保压取样和现场测试技术

7月14日上午, 国家海监总队南海支队和东海支队4名执法人员登船检查, 对调查活动、仪器设备和人员情况进行了检查; 上海边防总队对“太阳号”船进行了边检。

7月14日为开放日, 来自中国地质调查局、中国大洋矿产资源协会、广州海洋地质调查局、国家海洋局第一海洋研究所、第二海洋研究所、708船舶设计院、南京大学、同济大学、浙江大学、四川海洋特种技术研究所的科技人员共134人参观了调查船和航次成果; 7月14日晚上, 国土资源部举行了欢迎SO-177航次胜利归来的招待会, 国土资源部副部长、中国地质调查局局长寿嘉华专程到上海看望航次主要科学家, 出席招待会并发表讲话, 高度赞扬了中德科学家的拼搏和敬业精神。7月14日晚上, 寿嘉华一行6人, 登上“太阳号”船参观, 并听取了航次成果汇报, 对航次调查成果给予了充分的肯定。

7月15日下午, 国土资源部和德国教育研究部联合在上海港高阳国际客运码头举行了



欢迎仪式,德国驻中国大使馆科技参赞Hartmut Keune博士和国土资源部副部长王世元先生出席了欢迎仪式并讲话,对中德合作项目的意义和航次成果给予了高度评价,来自德国教育研究部、IFM-GEOMAR和有关研究机构,中国科技部、国土资源部、国家海洋局、广州海洋地质调查局及涉海调查研究单位的100多人参加了欢迎仪式,并上船参观了调查仪器设备、方法和航次调查成果。

7月16日上午,“太阳号”船离开上海前往韩国,继续下一个航次的调查任务。

二、航次首席科学家和参加人员

航次首席科学家分别是德国基尔大学Leibniz海洋科学研究所Erwin Suess教授和广州海洋地质调查局总工程师黄永样,首席科学家助理吴能友博士。

参加SO-177/1航段的人员共48人,其中船员27人、科学家21人。科学家来自德方10人(分别来自基尔大学Leibniz海洋科学研究所IFM-GEOMAR和不来梅大学大洋边缘研究中心RCOM),中方11人(分别来自广州海洋地质调查局、中国地质大学(北京)、中国地质科学院矿产资源研究和国家海洋局第二海洋研究所)。参加SO-177/1航段的科学家见表1-2-1和图1-2-1。

参加SO-177/2航段的人员共53人,其中船员27人、科学家26人。科学家来自德方11人(分别来自基尔大学Leibniz海洋科学研究所、不来梅大学海洋和大陆边缘研究中心和柏林工业大学),中方15人(分别来自中国地质调查局、广州海洋地质调查局、中国地质大学(北京)、中国地质科学院矿产资源研究所、国家海洋局第二海洋研究所、青岛海洋地质研究所和南京大学)。参加SO-177/2航段的科学家见表1-2-2和图1-2-2。

三、航次工作小组

整个航次,两国科学家混合编为多波束水深测量和沉积地层浅层剖面测量、水体地球化学调查(剖面和站位)、海底电视观测、沉积物取样、沉积学、孔隙水地球化学测试分析等六个工作小组。

航次工作小组人员分工详见表1-2-3和表1-2-4。