

BOHAIWAN PENDI
SHENCENG TINGYUANYAN
SHENGTING TIAOJIAN YANJIU

渤海湾盆地深层烃源岩 生烃条件研究

曹代勇 王延斌 唐跃刚 杜美利 著

地质出版社



渤海湾盆地深层烃 源岩生烃条件研究

*Bohaiwan Pendi Shenceng Tingyuanyan
Shengting Tiaojian Yanjiu*

曹代勇 王延斌 唐跃刚 杜美利 著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书系中国石油天然气总公司“九五”科技工程项目子专题研究成果和国家自然科学基金项目阶段成果。作者以先进测试分析手段为依托,采用多学科综合研究方法,从生烃组分→沉积有机相→有利区块评价的研究思路出发,对渤海湾盆地地下古生界碳酸盐岩、上古生界煤系和新生界深层烃源岩的生烃条件进行深入系统的研究。确定了深层有效烃源岩分布层系,首次开展了深层三大层系全盆地范围的沉积有机相研究,建立了三大类烃源岩的综合评价标准,采用多种参数对渤海湾盆地深层主要生烃层系的生烃潜力进行了综合评价。

本书可供从事石油天然气地质、煤田地质研究和生产的科技人员以及高等院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

渤海湾盆地深层烃源岩生烃条件研究/曹代勇等著. -北京:地质出版社. 2001.9

ISBN 7-116-03440-4

I 渤… II 曹… III. 烃源岩-石油生成-研

究-渤海湾盆地 IV. P618.130.106.182.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 042039 号

责任编辑:郝梓国 苏锐康 王章俊

责任校对:关风云

出版发行:地质出版社

社 址:北京海淀区学院路 29 号,100083

电 话:010/82310758; 82324580

网 址: <http://www.gph.com.cn>

传 真:010/82310759

印 刷:北京印刷学院实习工厂

开 本:787×1092 1/16

印 张:13.5

字 数:325 千字

印 数:1—500 册

版 次:2001 年 9 月北京第一版·第一次印刷

定 价:36.00 元

ISBN 7-116-03440-4/P·2199

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行处负责调换)

前 言

渤海湾盆地是中国东部重要的能源基地,蕴含着丰富的油气藏,经过 40 余年的勘探开发,浅层油气资源已基本查明,并多已开发利用。目前,储采比不断降低,开采的投资和难度也越来越大,后备资源储量接替紧张的局势日趋突出。因此,进行深层(前新生界和埋深大于 3500m 的新生界)油气资源的研究勘探,既是渤海湾盆地扩大油气产量和储量的重要途径之一,也是实现我国油气资源“稳定东部、发展西部”战略的迫切需要。

渤海湾盆地深层烃源岩包括埋深大于 3500m 的以湖相泥岩为主的新生界、以海陆交互相为主的上古生界煤系和以海相碳酸盐岩为主的下古生界;生油(气)岩既有湖相泥岩又有煤及煤系泥岩、碳酸盐岩。深层烃源岩层系多、沉积—埋藏史和构造—热史复杂,导致深层烃源岩生烃条件在垂向上和平面上均呈现很大的差异。近年来各油田的勘探生产及科研成果表明,渤海湾盆地的烃源岩及生烃过程具有多源性和多期性特点,深层烃源岩对油气形成具有一定的贡献,全国第二次资源评价的结果表明,东部新区新层系和深层分别可望得到 48 亿 t 和 6 亿 t 的油气资源量。因此,对渤海湾盆地深部层系烃源岩生烃条件进行系统研究,对于了解生烃潜量、油气资源评价和确定有利勘探区块都是十分必要的。

中国石油天然气总公司在“九五”期间设立了科技工程项目“中国东部深层石油地质综合评价及目标选择”,本书内容为该项目学科专题“渤海湾及外围深层烃源岩研究”下属子专题“渤海湾盆地及外围深层烃源岩生烃条件评价”的主要成果。

本书研究区域为渤海湾的辽河、大港、胜利、华北、冀东、中原等油气区。主要研究层位包括埋深大于 3500m 的新生界、上古生界和下古生界。

子专题的主要研究任务是通过对于深层烃源岩生烃条件的多学科综合研究,确定深层有效烃源岩分布层系(层段),评价不同类型烃源岩的生烃潜力,建立上古生界煤系烃源岩和下古生界碳酸盐岩烃源岩的综合评价标准,结合沉积有机相和有机质热演化史的分析研究,确定深层有效烃源岩的空间展布,划分有利生烃区块,为勘探层系和区块选择及深层资源评价提供依据。

研究工作始于 1997 年 10 月,1999 年 12 月结束,历时两年。在“中国东部深层石油地质综合评价及目标选择”项目负责人譙汉生教授、项目办公室的热情关心和上级专题负责人王兆云博士的领导下,专题组全体成员团结协作、刻苦攻关。在全面系统收集、分析工区及周边地区地质资料的基础上,多次深入油田现场调研、采集样品,针对存在的关键问题,采用先进的分析测试手段、实验方法和理论,对渤海湾盆地地下古生界碳酸盐岩、上古生界煤系和新生界深层烃源岩的生烃条件进行深入系统的研究,取得一系列重要进展。

在开展专题研究工作的同时,还完成了一篇博士学位论文《渤海湾盆地中部地区上古生界煤系烃源岩组分组成、化学性质及生烃意义》(王延斌,1998 年 6 月)和一篇硕士学位论文《渤海湾盆地新生界各凹陷及典型剖面的深层烃源岩研究与评价》(姜鹏,1999 年 6 月)。在专题研究的基础上,相继申请获准三项国家自然科学基金项目:“沥青质体和矿

物沥青基质的来源、形成期次及生烃性研究”(编号 49772132, 负责人唐跃刚)、“造山带中有机质演化特征及其大陆动力学意义”(编号 49872067, 负责人曹代勇)、“渤海湾盆地 C—P 不同体系域煤和煤系泥岩对比研究”(编号 49972054, 负责人王延斌)。本书内容包含了上述基金项目的阶段性研究成果。

子专题由中国矿业大学(北京校区)承担, 主要研究人员有曹代勇教授、唐跃刚教授、王延斌副教授、杜美利副教授、张守仁博士、姜鹏硕士、傅正辉硕士、侯慧敏高级工程师、周云霞硕士、杨小红硕士和张会勇硕士等。曹代勇负责综合研究和专题汇总、杜美利负责下古生界生烃条件研究, 王延斌负责上古生界生烃条件研究, 唐跃刚负责新生界深层生烃条件研究, 张守仁负责计算机制图。

石油勘探开发科学研究院、中国矿业大学(北京校区)的领导和有关部门对研究工作给予了大力支持, 现场调研得到胜利、大港、华北、中原、辽河等油田研究院的支持和帮助; 石油勘探开发科学研究院戴金星院士、梁狄刚教授、谯汉生教授、程克明教授、王兆云高级工程师、何海清高级工程师、赵长毅高级工程师、何忠华高级工程师, 石油大学(北京)王铁冠教授、钟宁宁教授, 中国地质大学(北京)杨起院士, 淮南工学院唐修义教授, 中国矿业大学秦勇教授、姜波教授、朱炎铭副教授, 中国矿业大学(北京校区)韩德馨院士、任德贻教授、金奎励教授、毛鹤龄高级工程师、邵龙义教授、梁汉东副教授对研究工作提出了宝贵建议; 艾天杰工程师、戴世峰博士、戴纪民、周强等同志对实验研究提供了热情支持和帮助; 样品的测试分别由中国矿业大学(北京校区)地质中心实验室、“煤炭资源特性研究”国家专业实验室、石油勘探开发科学研究院分析测试中心、北京大学生物系电镜室、中科院武汉物理研究所波谱与能谱开放实验室等单位完成。专题研究和本书写作过程中参考了石油、地矿和煤炭系统的大量研究报告和内部资料。在此, 谨向上述单位和个人以及其他曾给予研究工作支持和帮助的同志表示衷心的感谢。

本书的前言、绪论和第一章由曹代勇执笔, 第二、三、四章由杜美利执笔, 第五章由杜美利和曹代勇执笔, 第六、七、八章由王延斌执笔, 第九章由王延斌和曹代勇执笔, 第十、十一、十二章由唐跃刚执笔, 第十三章由唐跃刚和曹代勇执笔, 第十四章由曹代勇、杜美利、王延斌和唐跃刚执笔, 全书由曹代勇统编定稿。

本书的出版得到国家自然科学基金(49872067)的资助。

目 录

前 言	
绪 论	(1)
第一章 区域地质背景与烃源岩发育	(10)
第一节 渤海湾盆地构造 - 沉积演化简史	(10)
第二节 烃源岩时空展布特征	(15)
第二章 下古生界烃源岩有机岩石学特征	(19)
第一节 下古生界碳酸盐岩烃源岩显微组分分类	(19)
第二节 显微组分有机岩石学特征	(21)
第三节 镜状体成因探讨	(28)
第三章 海相单组分化学性质及生烃性研究	(29)
第一节 海相单组分显微傅里叶变换红外光谱研究	(29)
第二节 海相单组分飞行时间二次离子质谱研究	(34)
第三节 热解 - 气相色谱研究及碳酸盐岩成烃模式探讨	(39)
第四章 下古生界源岩有机相和孢粉相分析	(42)
第一节 渤海湾盆地下古生界有机相	(42)
第二节 渤海湾盆地下古生界孢粉相研究	(50)
第五章 下古生界生烃性研究与有利区块评价	(58)
第一节 下古生界碳酸盐岩生烃性研究	(58)
第二节 下古生界有利区块评价	(69)
第六章 上古生界煤系烃源岩有机组分和组成特征	(76)
第一节 煤系烃源岩显微组分分类	(76)
第二节 煤系烃源岩有机组分特征	(78)
第三节 有机显微组分组成特征	(82)
第七章 煤系烃源岩有机组分化学成分、结构与生烃性研究	(90)
第一节 显微傅里叶变换红外光谱研究	(90)
第二节 固体 ¹³ C 核磁共振研究	(96)
第三节 飞行时间二次离子质谱 (TOF - SIMS) 研究	(100)
第四节 Rock - Eval 研究	(105)
第五节 热解 - 气相色谱 (PY - GC) 研究	(107)
第六节 煤系烃源岩生烃模式	(112)
第八章 层序地层和沉积有机相研究	(115)
第一节 烃源岩性质与层序地层学的关系	(115)
第二节 煤系烃源岩沉积有机相研究	(122)
第九章 上古生界煤系烃源岩生烃潜力和有利区块评价	(128)
第一节 煤系烃源岩生烃性研究	(128)

第二节	上古生界煤系有利生烃区块评价	(140)
第十章	新生界深层烃源岩有机岩石学研究	(152)
第一节	烃源岩沉积有机质分类	(152)
第二节	有机显微组分特征	(153)
第三节	有机显微组分组成特征	(157)
第十一章	渤海湾新生界烃源岩沉积有机相研究	(160)
第一节	沉积有机相划分	(160)
第二节	沉积有机相特征	(163)
第三节	新生界深层烃源岩沉积有机相模式和平面分布	(165)
第十二章	渤海湾盆地深层烃源岩生烃性研究	(167)
第一节	烃源岩评价标准	(167)
第二节	各凹陷有机质丰度	(169)
第三节	各凹陷有机质类型	(172)
第四节	各凹陷有机质热演化	(176)
第十三章	渤海湾盆地新生界深层烃源岩评价	(178)
第一节	典型钻井剖面的有机岩石学研究	(178)
第二节	新生界深层烃源岩有利区块综合评价	(189)
第十四章	主要结论与研究进展	(203)
参考文献		(206)

绪 论

一、渤海湾盆地深层油气勘探现状

向盆地深部进军是我国乃至世界各国扩大油气资源的重要途径之一。迄今为止,世界上进行深层油气勘探的国家已达 60 多个,其中,尤以美国和前苏联等油气生产大国勘探及研究工作量最大,并取得了一些实际资料和成果。世界上最深的产油井是美国路易斯安那州 Caillou 油田,生产层为 6544 ~ 6593m 的中新统,最深的产气井是美国西内盆地的 Mills Ranch 油气田,生产层为 8083m 的奥陶系,另外,美国西部盆地阿纳达科坳陷的贝尔塔 - 罗查斯 1 号井,井深达 9583m,终孔于奥陶系。对深部油气生成及保存条件的研究也展示了在盆地深部寻找新油气田的良好前景。

经过 40 余年的工作,尤其是 20 世纪 80 年代以来,渤海湾盆地已进行了大量的深层油气勘探工作。全区完成 > 3500m 的深层探井 1400 余口,试油探井 800 余口,有 200 余口获工业性油气流。现已初步查明,渤海湾盆地深层老第三系断陷大约有 44 个,累计面积约 5.6 万 km²,其中陆上的深层断陷约 35 个,总面积约 3.2 万 km²。深层探明石油储量 12.7 亿吨,天然气储量 268 亿 m³;初步预测深层剩余石油资源量为 36.98 亿 t,剩余天然气资源量为 1.042 万亿 m³。

渤海湾盆地新生界深层生油岩以沙四段一孔店组和沙三段为主,但各坳陷沉积 - 埋藏史差异较大,如黄骅坳陷的歧口凹陷和冀东南堡凹陷的中心区,沙一段埋深即可达 4000m 左右,辽河坳陷部分地区沙二段亦超过 3500m。因此,本区深层新生界沉积岩体积巨大,其烃源岩多处于成熟 - 过成熟演化阶段,表明深层老第三系具有很大的含油气潜力。

研究区古生界广泛发育,残留面积大、残留厚度多数超过 5000m。其中下古生界奥陶系、上古生界石炭系、二叠系山西组等层系(层段)有机质丰度较高,具备良好的生烃母质条件,镜质组反射率(R_o)多在 0.6% ~ 2.5% 之间,处于成熟 - 过成熟阶段。由于各构造单元的沉积 - 构造 - 热演化过程和程度存在较大差异,导致古生界烃源岩二次生烃作用较显著。本区钻入古生界的探井已达 1500 余口,探明了以上古生界煤系为主要烃源岩的苏桥油气田、文留气田;发现了一批以古生界为烃源岩的低产油气井或显示井,如黄骅坳陷孔西潜山孔古 3 井奥陶系原生工业油流、东濮坳陷文 23 井上古生界工业气流等,展示了深层油气勘探的良好前景。

20 世纪 80 年代以来,各油田和中国石油天然气总公司在各坳陷开展了程度不同的深层石油地质研究工作,相继完成了主要油气区深层石油地质条件综合评价、古生界区块早期评价、深层天然气和煤成气研究等一大批专题研究项目(戴金星等, 1980, 1982, 1986, 1988; 何中坦, 1983; 汪本善等, 1980; 王少昌等, 1983; 刘德汉等, 1985; 徐永昌等, 1985; 刘宝泉等, 1990; 王秉海, 钱凯, 1992; 胜利石油管理局地质科学研究院, 1995; 石油勘探科学研究院, 1996) 在深层烃源岩生烃条件评价方面取得了重要进展, 积

累了丰富的实际资料,为本书专题研究的开展奠定了良好的基础。

二、国内外研究进展

渤海湾盆地及外围地区深层烃源岩包含了三大套沉积岩系,一是埋深大于 3500m 的以湖相泥岩为主的新生界和中生界;二是以海陆交互相为主的上古生界煤系;三是以海相碳酸盐岩为主的下古生界和中新元古界烃源岩。生油(气)岩既有湖相泥岩、又有煤及煤系泥岩、碳酸盐岩。三大类烃源岩生烃条件不尽相同,对于湖相泥岩的生烃条件研究及评价,工作方法比较成熟,而对煤成烃条件和碳酸盐岩生烃条件研究尚处在发展完善过程中。

(一) 煤系烃源岩研究

煤及煤系源岩对油气生成的贡献是近年来研究的热点,煤和陆源有机质可以形成煤成气(包括煤层甲烷),目前已得到人们的公认,而对能否形成工业性油藏的认识则相对较晚。1968 年, Hedberg 通过对世界上 40 多个碎屑岩含油地层研究后认为,某些具有高蜡、低硫特点的油形成于非海相或浅水环境中沉积的砂页岩,其中往往含有煤层; Brooks 和 Smith (1967、1969) 通过地球化学方法论证了澳大利亚吉普斯兰盆地陆生植物的生油能力;自此开始,人们注意到含煤岩系作为烃源岩对成烃的贡献。经过几十年的研究与勘探,人们认识到含煤岩系烃源岩不仅是重要的气源岩,而且在合适的地质条件下也是重要的油源岩,并且在世界范围内寻找到一批与煤系地层有关的油气田,如澳大利亚吉普斯兰盆地,印度尼西亚库特盆地,加拿大马更些盆地,英国北海默里盆地及我国的吐哈盆地等,从而使得煤成烃的勘探、开发、研究都取得了丰硕的成果。

1. 煤系烃源岩的生烃能力

将煤系烃源岩作为重要的天然气源岩而进行研究,早在 20 世纪 50 年代就开始了(Karweil, 1956)。随着工作的深入,逐渐确立了煤系烃源岩可以形成大量气态烃,并释放、聚积成大气田的观点(Stahl, 1968; Teichmüller, 1974; Lutz, 1975; 戴金星, 1980),但对煤系有机质是否是有效的油源岩,以及到底是腐殖煤成油贡献大,还是煤系泥岩贡献大等问题的认识上有不同看法。在早期(80 年代以前),研究者(如 Tissot 和 Welte, 1978)通过对煤的干酪根类型、显微组分、地球化学特征研究,认为煤系有机质以产气为主,发现的少量与煤层共生的油藏被认为与煤系地层中泥岩有关。以后,随着在世界上陆续发现并证实了一些与煤有关的煤成油田,人们渐渐认识到煤系烃源岩也能生油并形成油藏。在这种认识的基础上,人们对不同地区、不同时代、不同成熟度的煤及显微组分进行了大量模拟生烃实验(Berttrand, 1986; Thompson, 1988; Durand, 1983; 杨天宇, 1983; 张文正等, 1987; 傅家谟, 1987; 徐永昌, 1978; 金奎励等, 1989),证实了煤在受热过程中,有一定的生油能力。Durand (1983) 的实验表明,各种成因的煤在热解时可产生高达 30% 的烃类,其中主要是液态组分。在我国,随着 20 世纪 90 年代以来西北侏罗系煤系地层中石油勘探的成功,大大促进了对煤成烃的认识和重视程度。总体说来,目前人们对煤系地层中有机质能够生油问题的认识是肯定的,但对能否聚积成藏还存在分歧。

2. 煤系烃源岩有机组分及其生烃性质

煤系烃源岩的有机质以高等植物为主,从而不同于海相和湖相烃源岩。Juntgen 和

Karwei (1966), Klein (1975) 较早的研究了不同煤岩组分在不同成熟阶段的成气过程, 许多研究者 (Durand, 1983; Thompson, 1985; Bertrand, 1986; Mukhopadhyay, 1986; 沈平, 1983; 傅家谟等, 1987; 金奎励等, 1989; 王铁冠等, 1990) 通过对各种煤及其中的显微组分进行有机岩石学、地球化学和热模拟实验综合研究, 普遍认为, 煤系生成液态烃的多少与煤中显微组分类型及其含量有关。煤中显微组分的生烃能力依次为, 壳质组 > 镜质组 > 惰质组, 因此, 壳质组是煤系烃源岩中主要生烃母质, 各种壳质组组分具有不同的生烃潜力、不同的生油门限、不同的产物组成和不同的油窗峰态和峰值。但世界上也有一些壳质组含量低的煤成油气藏, 如澳大利亚 Cooper 盆地二叠系煤中壳质组含量一般 < 14%; 我国吐哈盆地早中侏罗世煤中壳质组含量一般也 < 10% (张鹏飞和金奎励等, 1997), 由此, 促使人们对煤中主要显微组分——镜质组的深入研究。大量研究表明, 煤系有机质中大量存在的基质镜质体常常是煤成油的主要母质 (黄第藩, 1995; 赵长毅, 1995; 程克明等, 1996; 张鹏飞和金奎励等, 1997), 而基质镜质体中大量超微类脂体及细菌残体的存在为其具备良好的生烃潜力提供了理论依据 (王飞宇等, 1993; 赵长毅, 1995; 程克明等, 1996)。另外, 微生物活动对煤成烃的贡献也不可忽视 (Shan, 1990; 陈克明, 1994)。

目前人们对煤系烃源岩中不同类型有机组分生烃性质及潜力已有了比较深刻的认识, 存在的问题是如何定量地评价各种组分含量与生油的关系。Powell 等 (1984) 根据对澳大利亚煤成油的研究认为, 煤中富氢组分的含量必须达到 20% ~ 30%, 才能成为有效的生油源岩。Hunt (1991) 认为煤和陆源干酪根生成并排出油的条件是 H/C (原子数比) > 0.9; $I_H > 200\text{mg/gC}_{\text{org}}$, 壳质组含量 > 15%; Snowdon (1991) 通过物质平衡方法计算认为, III 型干酪根中富氢显微组分占 10%、生烃率达 $30\text{mg/gC}_{\text{org}}$ 时才能形成有效的生烃和排烃。傅家谟 (1990) 认为, 当煤中富氢组分低于 3% ~ 5% 时主要形成干气, 5% ~ 30% 时形成湿气与凝析油, 30% ~ 60% 时能形成高蜡油。黄第藩等 (1992) 根据对我国大量煤样研究认为: “成煤沼泽中壳质组分含量 10% 以上, 在气肥煤阶段可降低到 5%, 干酪根氢指数 (I_H) > $100\text{mg/gC}_{\text{org}}$, 热演化程度达到气—肥煤阶段 ($R_o < 1.5\%$) 并具有良好的油气聚积保存条件, 是有重要经济价值的煤成油田形成的三个必要条件”。尽管不同研究者提出了不同的富氢组分含量值, 但实际上, 由于煤及煤系烃源岩在沉积环境和母质类型上的特殊性, 导致各地区、各时代形成的煤系烃源岩的生烃性质及生烃潜力差别较大, 因此, 有些研究者在实验中常得出毫无变化规律甚至相反的结果 (Lu 等, 1990; Lewan 等, 1990; Bertrand 等, 1996)。这些问题的出现与煤系烃源岩有机组分类型复杂, 沉积环境多变, 成煤植物性质差异有关, 也与对煤系烃源岩中某些超微富氢组分认识、识别程度不够有关。

3. 沉积环境对煤系烃源岩生烃性的影响

煤的化学性质、显微组分类型及含量等性质与沉积环境及成煤植物有关, 而这些又直接影响到对煤成烃的贡献。Thomas (1981) 研究了澳大利亚陆相植物群演化对陆生有机质生烃能力的影响, 并以此得出二叠纪煤主要产气, 侏罗纪、第三纪煤既能产气, 也能生油的结论。这种结论在我国也有所体现, 我国的煤成油田主要与侏罗系煤有关 (黄第藩, 1989), 而石炭—二叠纪煤系中很少发现有规模的油田; 在加拿大和西北欧也有相同的现象。关于沉积环境和介质条件对煤成烃的影响, Powell (1985) 认为, 在中等氧化的环境条件下有利于木质素和纤维素降解, 并在沉积缺氧条件开始前使富氢的稳定组分得以富集, 从而形成优质的生烃层; Thompson (1985) 对印度尼西亚马哈卡姆三角洲煤成油研究

后认为,煤中富含壳质组与该区煤的异地成因有关。煤相和有机相 (Organic facies) 的理论和方 法应用到油气勘探开发和研究中,把有机岩石学、有机地球化学、沉积学融为一体,对一个地区 烃源岩进行系统的评价,促进了人们对沉积环境和烃源岩质量相互关系的认识。油气的成藏的先决 条件是烃源岩问题,而能反映其纵向和横向上的生烃情况,则取决于有机相带的分布,由此也决定 了有利区块的分布。

Roger (1980) 最早提出有机相的概念, Jones (1987) 将有机相划分出 A、AB、B、BC、C、CD、D 等 7 种,并定义为有机相是一个给定地层单位的可制图的亚单位; Huc (1990) 首次提出了有机相可以进行源岩定量评价。金奎励等在有机相基础上提出了沉积有机相的 概念,认为有机相作为一个地层实体应该既考虑有机质又考虑与之相关的无机物面貌,有机与无机 是一个相互联系的整体;强调有机相的划分对于任何成熟阶段烃源岩均可进行,而不必拘泥于 $R_o \leq 0.5\%$ 。基于对沉积有机相的认识,金奎励等 (1995, 1997) 在国内首次将其应用于准噶尔盆地和吐哈盆地侏罗纪烃源岩的评价,提出利于成油的煤形成于流水沼泽相。层序地层学的形成发展及应用于油气勘探、开发研究 (Paisley 等, 1991, 1993; Tyson, 1995, 1996), 使人们又能从盆地沉降与全球海平面变化及沉积物供给相互关系的角度来评述烃源岩的形成和质量。

4. 煤成烃模式的建立和烃源岩评价

在对煤及煤中各种显微组分生烃性质和生烃潜力充分认识的基础上,人们对煤成烃的演化阶段及模式进行了研究。Teichmüller (1974) 总结了从褐煤到无烟煤各个演化阶段挥发分、胶体性质、镜质组、孢子体、重烃与总有机碳比率、碳氢化合物成熟度及油气生成的变化情况,建立了煤演化途径与生烃之间的关系。发现并提出煤化过程中两次煤化跃变与生油窗上、下限的对应关系,即第一次跃变发生在 R_o 约 0.5%, 对应着进入生油窗;第二次跃变发生在 R_o 约 1.2% ~ 1.6%, 代表着生油窗的下限,表示煤成油的结束,这一研究结果为评价煤成烃奠定了基础。1982 年,在二次跃变之间又区分出一个与成烃高峰相对应的跃变, (R_o 约 0.8% ~ 0.9%), 进一步丰富了煤成烃的模式。1987 年, D.G. Murchison 在总结前人研究成果基础上,对煤中各种显微组分随着成熟度变化而出现的光学性质、生成烃类的组成及产物变化进行了系统研究并建立了相关关系图。我国学者傅家谟等 (1990) 建立的“煤成烃演化与石油演化对比示意图”和“煤成烃母质与煤成烃关系图”,也充分表现了各种显微组分随成熟度变化而出现的生烃性质、生烃潜力的变化。

由于煤及煤系烃源岩成因类型多、沉积环境复杂、成煤植物不同,从而造成不同地区、不同时代、不同沉积环境、不同成煤植物形成的煤系烃源岩在显微组分类型、含量、生烃性质和潜力等方面都有一定的差异,使得评价生油岩性能的一些常用地化指标和方法存在局限,造成煤系烃源岩评价的极大困难。目前用于煤系烃源岩评价的方法主要有:有机相法 (傅家谟, 1990)、沉积有机相法 (金奎励等, 1994, 1995, 1997)、有机岩石学方法 (Smith, 1987; 金奎励等, 1989; 张士亚等, 1986; 傅家谟, 1990)、有机地球化学方法 (Powell, 1984; 傅家谟, 1987; 刘德汉, 1987)、有机地球化学和有机岩石学相结合的方法 (Horsfield 等, 1987)、模拟实验法 (热压模拟实验, 加水热压模拟, PY - GC 法) 等等。除了上述评价方法外,近年来先进技术手段的应用,也为人们从化学组成和结构的深层次角度评价煤及煤系烃源岩的生烃潜力提供了可能。如根据显微傅里叶红外分析结果建立评价指标 (E.E. 布雷, 1970; 中国科学院地球化学研究所, 1977; 地质矿产部石油综

合研究大队, 1977); 根据 ^{13}C 核磁共振研究结果建立的评价指标 (秦匡宗等, 1995)。

(二) 碳酸盐岩烃源岩研究

碳酸盐岩广泛分布于世界大多数沉积盆地内, 且世界上的许多重大油田产于碳酸盐岩地层中, 据统计全球范围碳酸盐岩地层大约占已测量地层剖面的 19% ~ 22% (Pettijohn, 1957), 我国碳酸盐岩分布面积近 $3 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。世界石油储量约有一半的源岩是碳酸盐岩, 世界上现已查明以碳酸盐岩为主要烃源岩的盆地有 20 余个, 其中包括我国塔里木盆地、鄂尔多斯盆地、四川盆地等等。对于碳酸盐岩作为烃源岩的研究无疑具有极其重要的经济价值和社会效益。

人们对于碳酸盐岩作为烃源岩的认识晚于泥质岩烃源岩, 最早认为碳酸盐岩是烃源岩的为 Trask (1926)。20 世纪 80 年代以前, 对碳酸盐岩生烃性的研究极为分散而零星, 主要限于有机质丰度的探讨, 并与泥质岩源岩进行对比研究 (郝石生等, 1996)。进入 80 年代以后, 碳酸盐岩烃源岩含油气盆地的不断发现, 使得碳酸盐岩烃源岩的研究方兴未艾。我国碳酸盐岩烃源岩与国外的显著差别是多处于高成熟阶段, 研究难度远大于国外。10 余年来, 我国学者傅家谟等 (1989)、郝石生等 (1990, 1993, 1996)、金奎励等 (1994, 1997)、钟宁宁和秦勇 (1995)、程克明等 (1996) 对碳酸盐岩烃源岩进行了大量卓有成效的开拓性工作, 使得我国在相关方面的研究取得了长足的进步, 尤其是对低丰度、高热演化程度、埋深较大、母质类型以腐泥组分为主的高—过成熟碳酸盐岩烃源岩评价方面积累了丰富的研究成果, 形成了我国碳酸盐岩烃源岩的研究特色。国内外学者围绕碳酸盐岩烃源岩的研究主要涉及以下方面。

1. 碳酸盐岩有机组分分类和对组分双重属性的认识

有机组分分类是认识烃源岩生烃特点的基础, 碳酸盐岩有机组分的划分存在许多差异, 概括起来主要有根据全岩、干酪根、将全岩与干酪根同时考虑等几种分类体系。目前的趋势是在分类中既考虑全岩中组分特点及赋存状态, 又仔细研究干酪根中不同组分的特征, 注重组分在显微、超微两个层次上的变化; 随研究程度的深入, 对不同组分类型根据生源特点再进行详细划分。

有机组分具有岩石和地球化学双重属性 (金奎励, 1997)。对于有机组分双重属性的认识, 直接关系对碳酸盐岩烃源岩质量的综合评价, 是研究不同地区、不同时代海相碳酸盐岩生烃差异的重要途径。碳酸盐岩有机组分岩石属性的研究, 主要集中于不同单组分的光性特点、结构构造特点、热演化规律和油气生成等方面。有机组分的地球化学属性研究方面主要涉及到不同组分的化学性质、化学结构、碳同位素组成、碳氢组成、不同组分富集无机元素的能力与类别、化学性质与生烃性关系、化学结构与组分光学特征的关系、不同组分随热演化改变出现的地化特征分异规律、组分的地化特征与成因关系等多个方面。为了对单组分的生烃规律、演化途径加以充分认识, 一些学者还利用现代生物如粘球形藻 (*Gloeocapsomorpha prisca*) 等与有机组分进行比较研究 (刘大锰等, 1997), 从而获得了对有机组分更深入的了解。

海相碳酸盐岩中的常见单组分包括低等植物生源的细菌、藻类、疑源类, 来源于几丁虫、笔石、虫颚、介形虫、有孔虫、部分腕足动物等在内的动物有机组, 以及以沥青为代表的次生组分, 已往有关碳酸盐岩单组分的研究主要是对不同组分的总体特征研究, 而对

同一组分中不同生物类别化学性质及生烃特点的异同方面工作较少 (Goodarzi et al., 1984, 1987, 1989, 1992; Bertrand et al., 1985, 1987; Buchard and Lenan, 1990; 吴庆余, 1990; 周志炎, 1993; 金奎励, 1995; 王飞宇, 1995; 边立曾, 1995), 以至于在海相碳酸盐岩一些类别单组分的认识上还存在许多分歧, 如在镜状体的认识就有原生与次生之说, 多种生源解释的差别。

2. 碳酸盐岩烃源岩生烃机制与生烃模式

有机质丰度、类型、成熟度是评价烃源岩质量的基本指标, 长期以来不同学者从碳酸盐岩烃源岩与泥质岩烃源岩的比较、从碳酸盐岩烃源岩自然演化系列样品及热模拟实验、从不同时代和不同地区碳酸盐岩的特征差异等方面入手取得了许多研究成果。相关方面研究尚缺乏广泛认同的界限, 但方法却比较丰富多样。

相对于泥质岩烃源岩而言, 碳酸盐岩生烃机制与生烃模式的研究起步较晚, 目前, 在碳酸盐岩生烃机制研究中, 重点放在因有机组分赋存状态不同而出现的差异成熟作用和生烃迟滞效应等方面 (郝石生等, 1996; 程克明等, 1996)。有关碳酸盐岩生烃模式的研究主要通过热模拟实验进行, 郝石生等 (1984) 率先使用干法热模拟实验提出了我国最早的碳酸盐岩成烃模式, 此后有不少学者亦做过类似研究, 但均因方法和样品问题使得结果不够理想。黄第藩等 (1994) 和程克明等 (1994) 采用加水热模拟实验技术, 结合自然演化剖面 and 实际碳酸盐岩研究, 提出了碳酸盐岩“三段式”生烃模式。该模式认为碳酸盐岩有机质成烃的第一阶段为早期生物大分子解聚 (解聚沥青) 所形成的未成熟油阶段, 第二阶段为干酪根大量热解生烃阶段, 第三阶段即深成作用后期和变生阶段有机质包裹体的释放成烃阶段。该模式强调早期生烃和高过成熟阶段包裹有机质生烃的重要性, 指出了碳酸盐岩生烃范围 (尤其是生油范围) 宽于泥质岩烃源岩。金奎励、刘大锰等 (1994, 1997) 根据不同类型现代生物, 采用小玻管热模拟方法提出了海相源岩中动物成油要早于藻类, 动物成烃的途径是脂肪烃缩合作用, 而藻类 (蓝藻) 成烃则主要是脂族链及侧链断裂和芳环缩聚的结果。郝石生等 (1996) 通过不同时代、不同地区、不同有机质类型的未熟碳酸盐岩烃源岩加水热模拟实验, 得出了不同成烃阶段碳酸盐岩有机质的气态产物 (气态烃产率、组成成分和特征)、轻烃产率与组成、热解油、氯仿沥青“A”、氯仿沥青“C”产率与族组成、烷烃与芳烃特征和类型、碳同位素特征等; 同时, 对全岩样品和热模拟残渣地球化学特征、有机岩石学特征及干酪根的光性特征和化学结构, 化学性质进行了深入分析, 极大地丰富和提高了对碳酸盐岩有机质生烃机理的认识, 为碳酸盐岩烃源岩的定量评价奠定了基础。

3. 碳酸盐岩有机质原始状态恢复与丰度下限的确定

我国碳酸盐岩烃源岩以高一过成熟阶段为主, 其残余有机质丰度、生烃潜力、有机质类型与原始有机质丰度、生烃潜力和有机质类型之间存在较大差异。对碳酸盐岩有机质原始状态的恢复, 旨在从深层次上阐明碳酸盐岩烃源岩的生烃规律与质量。对于原始有机质丰度的恢复主要采用热模拟手段, 目前常用方法有残碳模型恢复法、物质平衡法、元素模型法和谱学模型法等 (郝石生, 1996; 金奎励等, 1997; 陈丕济等, 1983; 曹慧缙, 1987), 也有根据干酪根岩石热解提出的碳酸盐岩原始有机碳恢复方法 (程克明等, 1982; 邬立言等, 1986), 亦有根据沉积岩中剩余有机碳含量来推测原始有机碳含量 (陈子恩, 1980)。不同方法恢复出来的原始有机碳有一定出入, 这与不同参数随有机质类型、成熟

度改变的差异性有关。在原始有机质类型恢复方面, 尽管也有许多方法, 但其中最为有效者当数有机岩石学方法, 因为组分类型的识别, 不会随成熟度改变而发生改变。对于有机质生烃潜力的恢复, 有以干酪根岩石热解为基础的多参数恢复法、以干酪根碳同位素特征为依据的恢复方法和通过不同单组分研究提出的生烃潜力恢复方法等等 (郝石生等, 1996; 邬立言等, 1986; 金奎励等, 1997)。不同方法间依然存在若干差别, 作者认为以单组分随热演化程度改变规律为基础提出的生烃潜力恢复方法更为切合实际。

有关碳酸盐岩烃源岩有机质丰度下限的研究是区分烃源岩与非烃源岩, 进行油气勘探的重要一环, 引起众多学者的瞩目。不同学者或通过模拟实验、或通过自然演化系列样品分析对碳酸盐岩有机质丰度下限提出了许多观点, 其数值从 0.03% ~ 0.5%, 差别甚大, 但总的认识似乎是低熟阶段高于 0.2%, 高过成熟阶段低于 0.2%。

4. 碳酸盐岩孢粉相及沉积有机相研究

孢粉相分析 (Palynofacies analysis) 是近 10 年来国际有机岩石学与孢粉学研究的前沿领域。孢粉相是一种生物相, 诞生于 20 世纪 50 年代末, 成熟于 90 年代初 (Muller, 1959; Combaz, 1964, 1980; 阿姆斯特丹有机质工作组国际会议, 1991)。孢粉相分析广泛应用于沉积有机质类型的确定与划分、碳氢指标潜力分析、沉积环境分析 (尤其对泥岩、碳酸盐岩等均一岩性地层)、确定源岩成熟度、提高生物地层对比精度等。当前国际上孢粉相的研究多集中于中生代地层 (Muller, 1959; Combaz, 1964, 1980; Tyson, 1984, 1993, 1995; Eley and Legault, 1988; Sarjeant et al., 1992), 而对于早古生代无陆生高等植物的纯海相高过成熟烃源岩研究尚未见公开报道。孢粉相分析是完整、准确的认识有机相的先导和基础, 是有机组分岩石属性的具体体现, 而有机相则是组分岩石属性和地球化学属性的完整反映, 是碳酸盐岩烃源岩定量评价的必由之路。当前对于陆相烃源岩有机相的研究已比较成熟, 而海相烃源岩有机相的实际应用工作显得较为薄弱; 国内仅限于塔里木盆地 (张景荣和边立曾等, 1995) 和鄂尔多斯盆地 (张爱云等, 1996)。

5. 碳酸盐岩成熟度与生烃历史的研究

碳酸盐岩成熟度是判断烃源岩成烃相态的关键, 对它的研究方法包括不同显微组分的光学参数 (反射率、荧光强度、红绿商、荧光最大波长等)、孢粉、疑源类、无定形、牙形石等的颜色指数、孢粉热变指数及诸多地球化学参数等等。对于高过成熟碳酸盐岩源岩成熟度研究, 有机岩石学方法最为实用和简便。以成熟度研究方法为基础, 结合时间 - 温度指数法、地壳运动历史等在内的碳酸盐岩生烃史研究, 对客观估计烃源岩生烃类型、生烃过程、生烃量具有重要意义。包括渤海湾盆地在内的我国北方下古生界碳酸盐岩烃源岩基本上均经历过多次抬升, 具有多次生烃特征, 对其成烃史的研究显得尤为突出和必要。

三、深层烃源岩生烃条件研究方面存在的主要问题

1. 研究程度在区域上不平衡

渤海湾盆地涉及 6 大油区 (辽河、华北、冀东、大港、胜利、中原), 深层烃源岩层系多、沉积 - 埋藏史和构造 - 热史复杂, 导致深层烃源岩生烃条件在垂向上和平面上均呈现很大的差异, 尚缺乏系统的对比研究。

2. 各区深层勘探程度不均衡

有些层系、地区资料相对缺乏、烃源岩埋深大、深层钻井取心不全、源岩样品的分析

资料也较少,客观上给深层烃源岩研究带来了较大的困难。

3. 煤和煤系泥岩、碳酸盐岩等烃源岩的评价标准尚存在较大争议

前人研究成果表明,煤系地层评价标准,各地区有其特殊性,我国东部上古生界海陆交互相煤系与西部中生界陆相煤系源岩评价标准必然也具有很大差异。渤海湾地区下古生界高成熟度、低丰度的碳酸盐岩烃源岩评价标准同样存在较大争议。

4. 深层烃源岩生烃性评价工作薄弱

由于对深层烃源岩的数量和质量了解不足,影响到对深层有效烃源岩的确定以及划分深层主力生烃层系(层段);三大类烃源岩沉积有机相研究尤其是有机相与油气生成关系的研究程度较低,也影响到深层有利生烃区块的评价。

四、研究工作与主要进展

专题研究从1997年10月至1999年12月,历时2年。在全面系统收集、分析工区及周边地区地质资料的基础上,专题组5次深入胜利、大港、华北、中原和辽河油气区进行现场调研,观察重点钻井58口、采集钻井深层源岩样品500余件、收集渤海湾盆地烃源岩评价及其相关资料120余份。开展源岩样品系统的有机地球化学和有机岩石学测试分析工作,完成各类分析测试1800项次,编制全盆地范围各类成果图件53幅,其中工业制图18幅。专题研究以先进测试分析手段为依托、采用多学科综合研究方法,从生烃组分→沉积有机相→有利区块评价的研究思路出发,确定深层有效烃源岩分布层系,建立了渤海湾盆地下古生界海相碳酸盐烃源岩和上古生界煤系烃源岩的综合评价标准,丰富了煤成烃理论及碳酸盐岩油气生成理论,对本区古生界油气生成理论研究和深层资源评价具有重要的参考价值。

本书共分为14章,第一章总结了渤海湾盆地深层烃源岩发育的地质背景,第二章至第五章是对下古生界海相碳酸盐岩生烃条件的系统研究,第六章至第九章是对上古生界煤系生烃条件的系统研究,第十章至第十三章是对老第三系深层生烃条件的系统研究,第十四章是成果总结。

渤海湾盆地深层烃源岩生烃条件研究进展主要体现在以下几方面:

1. 对三大类烃源岩有机质组成特点进行了深入系统研究,补充完善了适用于本区三大类烃源岩评价的显微组分分类方案

着重从有机岩石学的角度对渤海湾盆地下古生界碳酸盐岩烃源岩、上古生界煤系烃源岩和新生界深层湖相烃源岩的有机组分及其组成特点进行了深入系统研究,在前人工作的基础上,补充完善了适用于本区三大类烃源岩评价的显微组分分类方案。对作为早古生代海相烃源岩成熟度重要标志的镜状体进行了深入研究,提出镜状体为原生的动物壳碎片和动物皮层凝胶化合物成因;论证了壳质组和腐泥组含量是决定本区煤系烃源岩形成油气的物质基础;提出了沉积有机基质的概念,划分出了6种沉积有机基质类型,并肯定了有机基质的生烃贡献。

2. 肯定了下古生界碳酸盐岩烃源岩和上古生界煤系烃源岩的生烃能力,补充完善了三大类烃源岩的评价标准

综合采用多种微区和谱学分析测试技术对海相和煤系烃源岩有机组分的化学组成和结构进行了深入研究,将飞行时间二次离子质谱(TOF-SIMS)技术应用于本区烃源岩评价,

提出了判断有机质类型、成熟度和生烃潜力评价的 TOF-SIMS 新参数。通过对有机组分的宏观、微观和分子级层次上的综合研究,肯定了渤海湾盆地地下古生界碳酸盐烃源岩和上古生界煤系烃源岩的生烃能力,补充完善了本区三大类烃源岩的评价标准,总结了不同层系和不同区块烃源岩的质量及其差异,确定了三大层系相应的主要生烃层段及其生烃潜力。

3. 首次开展了深层三大层系全盆地范围的沉积有机相研究,将孢粉相分析和层序地层学方法引入烃源岩生烃性研究领域

从组分的岩石学和地球化学双重属性角度出发,综合考虑沉积环境、有机组分及地球化学性质等方面的标志,建立了渤海湾盆地三大类烃源岩的沉积有机相划分方案。将定量评价引入沉积有机相研究之中,通过有机相特征分析对不同有机相类型的生烃潜力进行了分类排队和合理评价:下古生界的局限海有机相,上古生界的深沼森林有机相和流水沼泽有机相,新生界的藻源相和混源相分别为有利的生烃相带。研究了下古生界不同有机相的孢粉相组成特征,加深了对烃源岩质量变化原因的认识;探讨了煤系烃源岩有机组分组成及生烃性质与层序地层的关系,揭示了本区晚古生代层序地层中不同体系域煤系烃源岩的有机组分、组成及生烃性质的变化规律。

4. 对渤海湾盆地深层生烃条件进行了深入研究,编制完成主要生烃层系的有利区块评价图件

运用有机岩石学、有机地球化学、古生物学、沉积学等学科知识和方法手段,研究了三大类烃源岩的生烃条件,使用多种参数对渤海湾盆地深层主要生烃层系的有利区块进行了综合评价。评价结果表明:大港油气区南部、胜利油气区沾化凹陷等地区是下古生界最有利的生烃区块;上古生界煤系是良好的气源岩,其中黄骅凹陷是比较有利的煤成油气区、济阳凹陷以寻找晚期干气为重点。冀中凹陷属于比较有利于煤成湿气藏形成的地区;新生界深层烃源岩最有利的生烃区块为辽西凹陷,有利的生烃区块包括辽东凹陷、岐口、沧州-南皮、霸县、沾化-埕北、车镇、东营和东濮等凹陷。

第一章 区域地质背景与烃源岩发育

第一节 渤海湾盆地构造-沉积演化简史

渤海湾盆地位于我国东部，包括华北平原北部、下辽河平原和渤海海域，整体上盆地中部宽，南北两端窄，呈北东—南西向反“S”形展布，总面积约 60 余万平方千米。盆地西邻太行山隆起带，北抵燕山褶皱带，东部和东南部为辽东、胶东和鲁西隆起，南端与南华北盆地的开封坳陷过渡，是叠加在古生代华北克拉通巨型坳陷之上的中、新生代界裂谷盆地（图 1-1），其次级构造单元划分如图 1-2 和表 1-1 所示。盆地内发育辽河（辽河油气区）、黄骅（大港油气区和冀东油气区）、冀中（华北油气区）、济阳（胜利油气区）、临清和东濮（中原油气区）等大型坳陷，是我国重要的油气富集区。

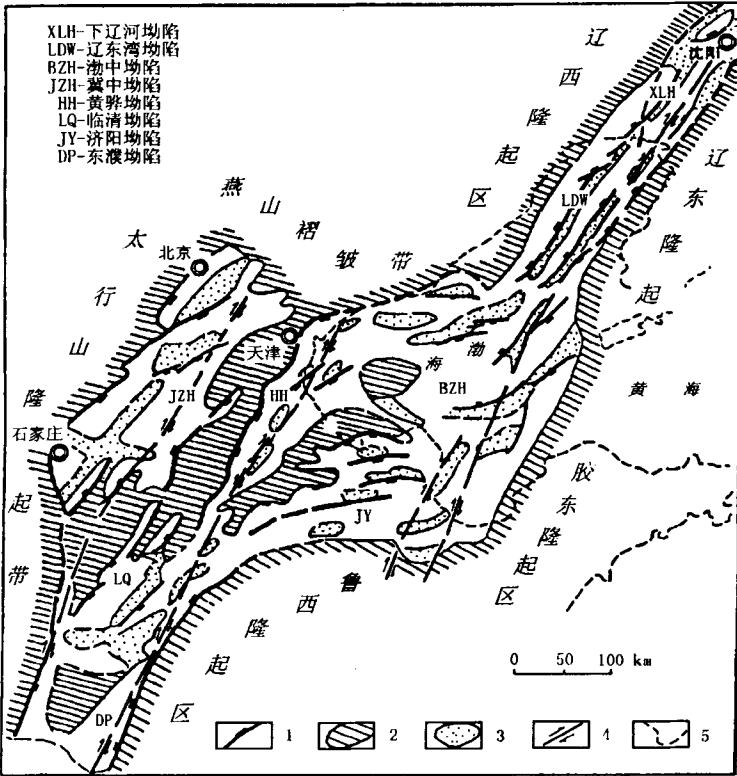


图 1-1 渤海湾盆地构造轮廓图

（据漆家福等，1997）

1—老第三纪断陷边界正断层；2—老第三纪隆起；3—坳陷内凸起；4—走滑断层带；5—海岸线