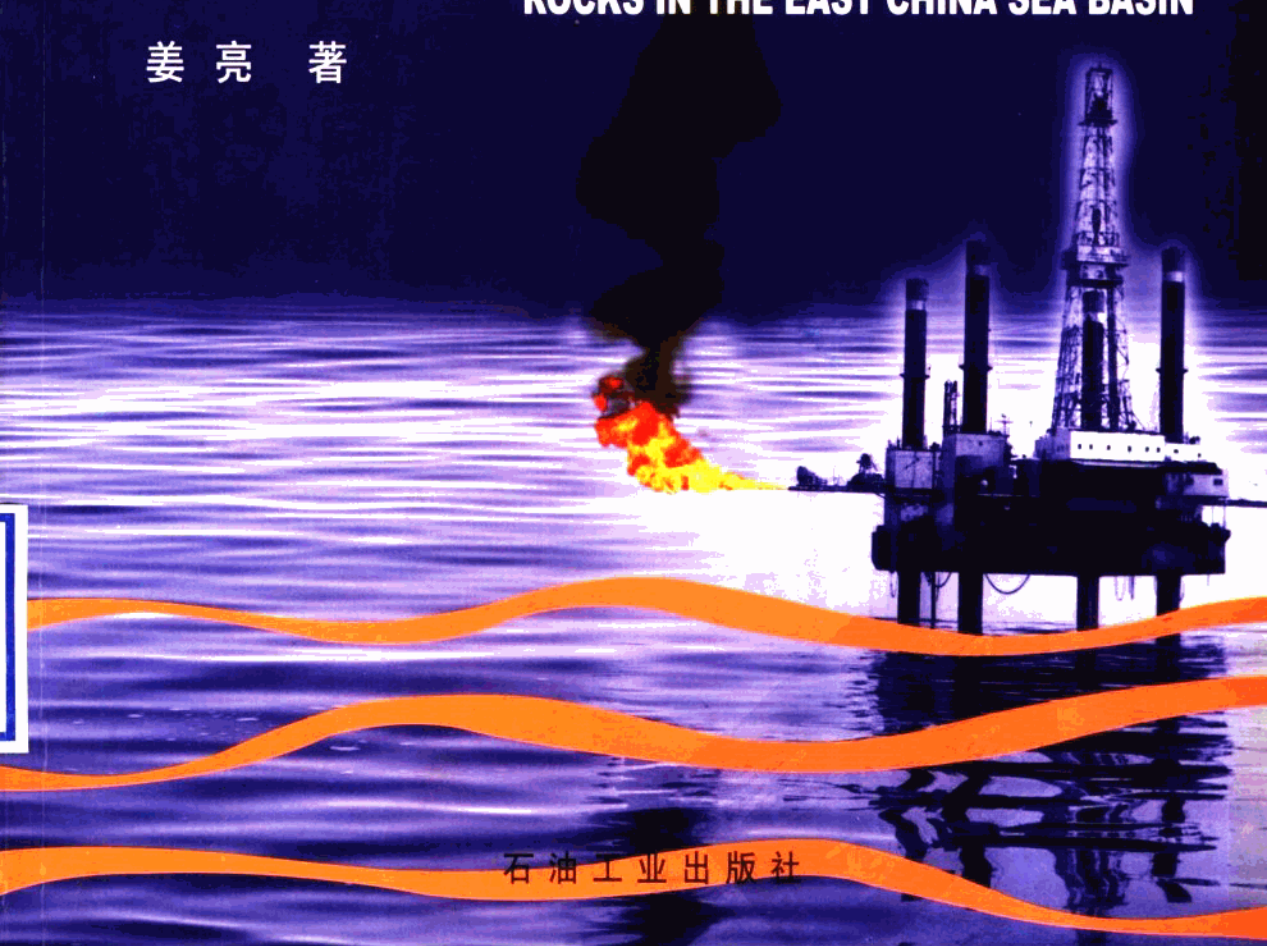


东海陆架盆地

第三系煤系烃源岩 油气生成与聚集

STUDY ON HYDROCARBON GENERATING
MIGRATION AND ACCUMULATION OF THE TERTIARY SOURCE
ROCKS IN THE EAST CHINA SEA BASIN

姜 亮 著



石油工业出版社

P618.130.2
J-479

东海陆架盆地第三系煤系 烃源岩油气生成与聚集

姜 亮 著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书从东海陆架盆地第三系煤系的成煤物质组成、物理化学性质、显微组分的化学结构、生烃特点及潜力、盆地热演化史、生烃史、油气运移聚集时间和期次等方面系统地讨论了第三系煤系油气生成的控制因素和资源量;从多学科综合研究的角度着手,采用了显微傅里叶红外光谱、核磁共振、二次离子质谱及自生伊利石测年等先进的分析测试手段,对东海陆架盆地第三系煤系在该区油气资源形成中的意义作出了科学的评价。

书中资料丰富,研究思路新颖,具有较高的实用性和学术价值,适合于石油天然气、煤炭、地质等部门的教学、科研和生产技术人员、研究生和本科高年级学生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

东海陆架盆地第三系煤系烃源岩油气生成与聚集/姜亮著.
北京:石油工业出版社,2002.11

ISBN 7-5021-3923-0

I. 东…

II. 姜…

III. ①东海-大陆架-含油气盆地-第三纪-煤系-石油生成-研究

②东海-大陆架-含油气盆地-第三纪-煤系-油气聚集-研究

IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 067004 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

河北省徐水县印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 10.5 印张 268 千字 印 1—1000

2002 年 11 月北京第 1 版 2002 年 11 月河北第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3923-0/TE·2835

定价: 30.00 元



作者简介

姜亮 1959年7月生于贵州省贵阳市, 1976年10月参加任丘油田石油会战。1983年大学毕业后分配到石油工业部华北石油管理局勘探开发研究院工作, 任勘探室副主任。1991年获成都地质学院煤田、油气地质与勘探专业工学硕士学位。1994年11月调入中国海洋石油东海石油地质研究所工作, 先后任研究所勘探室主任、总地质师、副所长。2001年获中国科学院地球化学研究所地球化学专业理学博士学位, 师从于涂光炽院士。同年9月进入清华大学工程力学系博士后站。现任中海石油(中国)有限公司上海分公司勘探部经理, 中国石油学会石油地质专业委员会委员、中国古生物学会理事、上海市地质学会常务理事、中国海洋石油勘探专业标准化委员会委员及中国海洋石油储量委员会委员。作者26年来边工作边学习, 长期从事陆地、海洋石油与天然气勘探开发研究和生产管理工作, 先后参加完成石油工业部“七五”储层攻关研究项目、国家“八五”天然气攻关研究项目、中国海洋石油“九五”东海科技攻关研究项目及国家“九五”科技攻关东海研究项目。工作所涉及地区如: 渤海湾盆地、二连盆地、塔里木盆地、吐哈盆地、南黄海盆地及东海陆架盆地。其主要成果获国家科技进步奖一项, 省部级二、三等奖三项; 在国际刊物发表论文5篇, 国内刊物近30余篇; 已出版专著两部。

序

煤成烃作为一种非常规油气资源,已经从研究逐渐走向开发利用。今天煤成烃在整个油气资源中的重要性日益增强,特别是煤成气的资源量十分巨大,据估计,全球约80%以上的天然气资源与煤系有关,而石油储量的5%~8%也与煤系相关。我国是一个煤炭资源十分丰富的大国,煤成烃资源也极为丰富。从“六五”以来,我国政府和煤炭及石油工业部门都高度重视煤成烃的研究和勘探开发,近年来成效斐然。至1998年底全国煤成大中型气田探明总储量占全国大中型气田探明总储量的64.18%,并且探明储量排名前4位的大气田均是煤成气田,而煤成油的勘探由于1989年在吐哈盆地侏罗系中发现了煤成大油田也取得重大突破。煤成烃在能源中的地位将日益提高。

由于我国煤成烃的勘探取得重大突破主要集中在古生代和中生代煤系地层,因此有关煤成烃的研究偏重于中生代和古生代的煤系地层,而对我国第三系煤系煤成烃的机制、生烃潜力及其控制因素和煤成烃的分布规律则缺乏深入研究和探讨;另一方面,第三纪却是我国一个重要的聚煤期,世界一些国家发现了源于第三系煤系的煤成烃聚集,煤成油田则以白垩系—第三系煤系成因为主。姜亮博士通过对东海陆架盆地第三系煤系的沉积环境、含煤盆地的构造类型及形成演化、煤系有机质的地球化学和岩石学特征以及第三系煤成烃的成藏分布规律的详细研究,在大量实验资料和多学科交叉研究的基础上撰写了这本专著。

本书作者姜亮博士具有长期从事陆上与海洋油气地质和地球化学方面丰富的实践经验,他将生产与管理、勘探与研究有机地结合起来,既出色地完成了生产、勘探与管理任务,也为科研工作打下坚实基础。除扎实的野外工作外,他还掌握了若干重要实验方法和手段。他勤于思考,力图用综合方法攻坚。他结合油气田的任务,选择了目前我国还较薄弱的海上第三系煤系油气生成、运移和聚集作为研究课题。

本专著的要点和创新之处表现在:从多学科的综合研究的角度着手,采用了显微傅里叶红外光谱、核磁共振、二次离子质谱及自生伊利石测年等先进的分析测试手段,系统地研究了第三系煤系烃源岩的物质组成、物理化学性质、生烃特点及潜力、盆地热演化史、生烃史、油气运移聚集时间和期次,对第三系生烃意义较大的基质镜质体和树脂体组分进行了区分,并通过热解气相色谱和加水热模拟实验,结合微区分析技术,将有机显微组分对该区油气生成的贡献进行了区分,认为树脂体和基质镜质体对该区油的生成具有重要意义,并提出了显微组分生烃性质和潜力的评价参数—— T_a 、 T_o 、 T_g 等,为开展烃源岩评价提出了新的方法和思路,进而建立了第三系煤成烃机理和成烃模式。通过热演化史、有机包裹体和粘土矿物测年的分析,确定了生烃作用规模和成藏期次。作者对西湖凹陷油气资源量测算结果表明:下第三系煤在西湖凹陷乃至东海陆架盆地油气成藏过程中有着重要的贡献,下第三系煤系烃源岩中煤成石油和天然气资源总量分别占整个下第三系烃源岩资源总量的64.7%和58.9%,为下第三系的主力烃源岩。从而对东海陆架盆地第三系煤系在该区油气资源形成中的意义作出了科学的评价。

相信本专著出版不仅对我国方兴未艾的煤成烃资源勘探开发事业具有现实的指导意义，而且对发展和完善煤成烃的地质、地球化学理论也有重要价值。

最后，衷心祝愿本书的出版将进一步推动我国煤成烃的研究和勘探开发。

涂光灿

2001年9月

前 言

东海盆地是我国东部沿海地区重要的含油气盆地之一，其中第三系煤系地层分布广泛且厚度较大，近年来，随着油气勘探开发研究的深入，有关第三系煤系烃源岩在该区油气资源形成中的重要地位也越来越突出。东海盆地有三套烃源岩层，其中一套是以上古新世灵峰组为代表的海相烃源岩，另二套分别是以古新世月桂峰组为代表的湖相泥岩和古新世明月峰组、始新世平湖组和渐新世花港组为代表的以泥炭沼泽相为主的烃源岩。根据目前的研究成果，明月峰组煤系烃源岩在台北凹陷占有一定的地位，而平湖组和花港组煤系烃源岩则成为西湖凹陷的主要烃源岩层。因此，加强对东海盆地第三系煤系烃源岩生烃特性及油气运移期和成藏时间等研究，对东海盆地油气勘探开发具有极重要的理论和经济价值。

我国第三系煤系地层广泛分布在华南和东部沿海地区，从目前海上油气勘探研究看，该套地层在已发现的油气资源中占有重要地位，但与西北侏罗系及华北石炭—二叠系煤系烃源岩相比，有关它的物质组成、化学成分、生烃性质、生烃模式等基础性理论问题研究很少，除了赵师庆（1995）、王铁冠、刘道燕（1995）、姜亮、王延斌（1996、1998）等分别对百色盆地、东海盆地、山东黄县等地第三系煤及煤系烃源岩进行过相关研究外，其它地区基本上还是空白。为此，本书将东海盆地第三系煤及煤系烃源岩作为研究对象，应用有机岩石学、煤岩学、石油地质学、油气地球化学等学科的基础理论，采用显微傅里叶红外、核磁共振、二次离子质谱、热解气相色谱、加水热模拟等先进技术和测试手段，对该区煤系烃源岩的物质组成、化学成分与结构、生烃潜力与特征进行了深入细致的研究。明确了东海盆地西湖坳陷第三系煤系烃源岩的物质组成以镜质组为主，且其中镜质体 B（或称富氢基质镜质体）常见，含量可达 25%~55%；其次是壳质组，含量一般大于 10%，而惰质组含量一般小于 5%。煤中富氢组分以树脂体和基质镜质体 B 为主，尤其是树脂体含量丰富，在其边缘常见到与其具有渊源关系的渗出沥青体，这是煤系烃源岩形成烃类并发生运移的直接标志。暗色泥岩中则主要是矿物沥青基质和壳屑体。由于树脂体、角质体和孢子体的化学结构中富含甲基、亚甲基等富氢官能团，特别是树脂体中含有更为丰富的富氢官能团，因而具有强的油气生成能力。基质镜质体 B 也有少量脂肪族结构官能团。由单一有机显微组分的化学组成及其相对含量推断的生烃贡献的系数表明，对该区生油贡献最大的是树脂体；基质镜质体本身对生油的贡献较小，但由于它含量丰富，弥补了质量上的缺陷，对该区油的形成也有一定的贡献。有机显微组分的热解气相色谱和加水热模拟实验的结果证实了不同有机显微组分相对生烃能力的大小，并据此建立了东海盆地第三系煤系烃源岩生烃模式。与我国石炭—二叠纪和侏罗系煤及山东黄县第三系褐煤模拟实验对比表明，东海盆地第三系煤系烃源岩的生油能力相对较低，但最大生油温度明显提前，这与其中树脂体具有早期生烃的性质有关。这说明东海盆地第三系煤系烃源岩在该区油气资源形成中，以生气为主，生油为辅，从而决定了该区应该以天然气勘探开发为主的战略思路。

煤系有机包裹体类型、相态、丰度、分布特征、均一温度及化学成分（拉曼光谱）的研

究,结合储层自生伊利石 K—Ar 定年的测定和盆地沉积构造演化史及热史的综合研究显示了东海陆架盆地第三系煤系有多期次的油气生成、运聚和成藏。油气源对比也表明了煤系烃源岩是该区目前所采油气的主要源岩层,尤其是其中的树脂体成为主要生烃母质。总之探索我国第三系煤系烃源岩生烃机理,建立第三系煤系烃源岩生烃模式,预测东海盆地油气资源量并最终为东海盆地的油气勘探提供有益的参考是作者的主要构想,并自始至终贯彻在全书中。

中国科学院涂光炽院士欣然为本书作序;戴金星院士、韩德馨院士、田在艺院士、彭平安研究员、王延斌教授和姚素平副教授审阅了全书的初稿,并提出了宝贵的修改意见。在此表示衷心的感谢!

本书的内容若存在不足之处,恳请读者予以指正。

目 录

第一章 煤成烃的研究现状及存在问题	(1)
第一节 煤成油气田的发现及地质分布	(1)
第二节 煤系烃源岩及油气生成研究现状	(2)
一、煤系烃源岩生烃能力的认识	(2)
二、影响煤系烃源岩生烃能力的研究	(3)
三、煤成烃模式的建立	(5)
四、煤系烃源岩评价	(5)
第三节 煤成烃研究存在的问题	(6)
第四节 研究区勘探研究现状及存在问题	(6)
第二章 东海陆架盆地的形成与演化	(9)
第一节 区域构造背景	(9)
第二节 盆地的形成与演化	(11)
一、构造运动与构造层序划分	(11)
二、盆地构造演化	(14)
第三节 地层及层序格架	(18)
一、地层	(18)
二、层序地层格架	(21)
第四节 煤系烃源岩沉积环境及分布	(23)
一、主要沉积相和沉积体系	(23)
二、煤系烃源岩厚度	(29)
第三章 煤系烃源岩有机岩石学特征	(31)
第一节 有机显微组分	(31)
一、镜质组	(32)
二、惰质组	(33)
三、壳质组	(33)
四、腐泥组	(34)
五、次生组分	(35)
六、矿物沥青基质	(36)
第二节 有机显微组分组成	(37)
小 结	(40)
第四章 主要有机显微组分的化学成分与结构	(42)
第一节 显微傅里叶红外光谱研究	(42)
一、吸收峰归属	(43)
二、不同有机显微组分的研究	(45)
第二节 固体 ¹³ C 核磁共振研究	(49)

一、原理及实验条件	(49)
二、不同有机显微组分核磁共振研究	(51)
三、不同地质时期煤中主要有有机显微组分化学成分与结构的对比	(53)
四、东海陆架盆地第三系煤系烃源岩中主要有有机显微组分生烃潜力的核磁共振评价	(56)
第三节 飞行时间二次离子质谱 (TOF—SIMS) 研究	(58)
一、TOF—SIMS 的基本原理及实验条件	(58)
二、煤及烃源岩二次离子峰归属	(58)
三、主要有有机显微组分 TOF—SIMS 谱图特征	(59)
四、TOF—SIMS 参数讨论	(62)
小 结	(64)
第五章 煤系烃源岩生烃特征与潜力评价	(65)
第一节 煤系烃源岩生烃潜力的有机岩石学研究	(65)
第二节 热解—气相色谱 (Py—GC) 研究	(67)
一、样品分析结果	(67)
二、石炭—二叠纪和侏罗纪煤的对比	(71)
第三节 加水热压模拟实验	(72)
一、实验样品及程序	(72)
二、实验结果	(72)
第四节 煤系烃源岩生烃模式	(77)
小 结	(78)
第六章 煤系烃源岩生烃演化史	(79)
第一节 煤系烃源岩埋藏抬升史	(79)
一、主要烃源岩层位及类型的变化	(79)
二、沉积构造演化	(79)
第二节 有机质热演化作用	(83)
一、镜质组反射率剖面	(83)
二、剥蚀厚度的确定	(84)
三、古地温及古地温梯度	(87)
四、主要烃源岩层段原始成熟度的确定	(93)
第三节 煤系烃源岩油气生成史	(97)
一、台北坳陷明月峰组	(97)
二、西湖凹陷花港组和平湖组	(98)
小 结	(100)
第七章 油气源对比	(101)
第一节 源岩可溶抽提物地球化学特征	(101)
第二节 原油地球化学特征	(102)
一、原油的物性	(102)
二、标志性化合物特征	(103)
第三节 天然气地球化学特征	(106)

小 结	(107)
第八章 油气运移时间和期次	(109)
第一节 有机包裹体研究	(109)
一、有机包裹体研究与应用	(109)
二、研究样品地质特征及方法	(110)
三、有机包裹体基本特征	(111)
四、有机包裹体成分分析	(113)
五、包裹体均一测温与成岩作用	(118)
六、有机包裹体与油气生成的关系	(122)
第二节 自生伊利石测年研究	(123)
一、分析样品及粘土矿物组成和含量	(123)
二、自生伊利石测年与油气充注时间	(125)
第三节 油气注入期次与时间	(126)
一、西湖凹陷中央反转构造带	(126)
二、西湖凹陷西斜坡带及黄岩地区	(128)
三、台北坳陷	(128)
小 结	(128)
第九章 煤成烃资源量及远景预测	(129)
第一节 煤系烃源岩生烃综合评价	(129)
一、有机质丰度	(129)
二、有机质类型	(130)
三、有机质热演化程度	(131)
第二节 煤成烃资源量及远景预测	(132)
一、油气生成量计算公式	(132)
二、烃源岩分布及厚度	(132)
三、残余有机碳含量	(134)
四、残余有机碳恢复系数的确定	(136)
五、生烃图版式的建立	(139)
六、煤系源岩的有机质类型	(139)
七、烃源岩密度	(140)
八、油气运聚系数的确定	(140)
九、油气资源量预测结果	(140)
小 结	(144)
结 论	(145)
参考文献	(147)
图版说明	(151)

第一章 煤成烃的研究现状及存在问题

煤成烃是指含煤地层有机质（包括煤层有机质与含煤地层沉积岩分散有机质）在成煤作用过程中形成的碳氢化合物，这种含烃化合物或烃类物质可以是气态的（煤成气），也可以是液态的（煤成油）（傅家谟，1990）。含煤岩系作为重要的气源岩能形成大规模的天然气聚集已得到人们的共识，而对能形成工业性油藏的认识则相对较晚。从严格意义上来说，煤成烃主力源岩必须是煤层，单纯由含腐殖型或腐泥—腐殖型有机质泥页岩生成的石油或天然气只是一般意义上的陆相生油和海陆过渡相有机质生烃，不应属于煤成烃范畴。事实上，“煤成烃”这一现象的存在由来已久，在煤矿开采过程中，煤矿瓦斯历来是煤矿生产的主要灾害，不仅如此，在煤中也常能见到生油迹象，甚至就在煤中见到了石油，但由于所找到的与煤有关的工业性油藏甚少而被忽略。近年来，随着国内外一批大型煤成油气田的发现，特别是工业性煤成油田的发现和开采，使得煤成油研究成为各国学者热衷研究的课题，以煤系地层为目的层的石油地质勘探也已成为寻找石油资源的新领域。煤成油的发现和煤成油理论的建立对油气成因理论的发展和改善石油资源的紧张状况无疑具有重要的理论和实际意义。

第一节 煤成油气田的发现及地质分布

煤能生成油气的观点最早可追溯到俄罗斯学者罗蒙诺索夫于 1759 年发表的《论地层》一书中他从煤中富含油脂和瓦斯的现象提出煤、油和气同源的观点。世界上很多国家在煤矿开采过程中均发现了煤、油、气共生现象，如法国 1834 年发生了世界上有记载的第一次煤和甲烷气体突出、德国萨尔地区弗兰肯赫兹的石油和煤共生以及英国米德兰煤矿的石油等等，并且在 18 世纪中期人们就发现能从煤中提炼出石油，19 世纪 20 年代德国已正式设立工厂用煤制造石油了，其规模达到每年 $10 \times 10^4 \text{t}$ 的产量。尽管如此，煤作为油气源的重要性直到 20 世纪 40 年代德国学者提出了煤系有机质也能生成天然气并可能形成常规天然气田的观点才引起了地质学家和各国政府的关注。此后各国相继对煤系展开了资源评价，并肯定了煤系是好的气源岩，从而创立了煤成气理论，并有效地指导天然气的勘探和开发，取得了重要进展，如今俄罗斯 70% 以上的天然气储量是煤成气，我国煤成大中型气田探明总储量占全国大中型气田探明总储量的 64%，煤成气在世界天然气储量增长中起着举足轻重的作用。但人们对煤成油的认识仍相当缓慢，煤能生油的观点没有得到足够的重视，其最根本的原因是“煤层和油藏的关联甚少”（Durand 和 Paratte, 1983），富煤的时代并不富含油，产煤区往往并不产油。在 20 世纪 60 年代以前，人们没有发现在含煤岩系发育的盆地内找到由煤层和含煤物质形成的有工业意义的油田，在理论上也没有解决煤系生油的问题。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泥岩或页岩，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油的贡献，并成为近 30 年来煤岩学家和石油地质学家共同努力开拓的一个新的油气勘探领域。最早被确认为具有工业储量的煤成油田的澳

大利亚吉普斯兰盆地, 其产层为 Latrobe 群上白垩一下第三系 (K_3-E_2) 煤系地层 (油的可采储量为 $5.7 \times 10^8 t$, 气的可采储量为 $220 \times 10^8 m^3$ 米)。20 世纪 70 年代和 80 年代, 在煤系地层中寻找石油取得了重大突破, 世界各国相继发现了一批重要的煤成油聚集, 如印度尼西亚库特盆地 (第三系)、西北爪哇地区 (第三系)、加拿大的波弗特—马哈坎 (Mahakam) 三角洲马更些盆地 (第三系)、北海默里盆地和挪威近海豪坦班肯地区 (上三叠统一下侏罗统)、澳大利亚库珀—埃罗曼加盆地 (二叠系—侏罗系), 美国的圣胡安盆地 (上白垩统)、新西兰塔拉那基盆地 (上白垩统一下第三系) 等。

我国煤矿中的石油也不乏其例, 如浙江长兴、镇江东风、安徽新田等煤矿的煤和煤系砂岩中均有石油流出现象。我国在煤田地质勘探和煤矿开采过程中, 陆续发现了不少煤成油点, 如浙江长兴、江西乐平、四川南桐、河北苏桥、甘肃窑街、陕西黄陵等煤产地。在陆相石油勘探的研究过程中也发现一些具有煤成油地球化学特征的石油聚集, 如准噶尔盆地齐古油田和彩南油田 (侏罗系)、民和盆地虎头崖油田、柴达木盆地冷湖油田、塔里木盆地伊奇克里克油田、华北冀中凹陷及东濮凹陷石炭—二叠系煤系地层凝析油、四川盆地上三叠统煤系地层凝析油、南海莺—琼盆地第三系煤系地层凝析油等, 但直到 1989 年才在吐哈盆地侏罗系煤系地层中找到了具有工业油藏的煤成油田, 这也是我国目前仅有的一个大型煤成油田。经过几十年的研究与勘探, 人们最终认识到煤系烃源岩不仅是重要的气源岩, 而且在一定的物质组成、有机质成熟度等条件下, 也是重要的油源岩, 从而使得煤成烃的勘探、开发和研究都取得了丰硕的成果。

在世界范围内, 煤成油主要来自三套含煤岩系, 石炭—二叠系煤系地层, 侏罗系煤系地层和上白垩统一下第三系煤系地层, 其中上白垩统一下第三系煤成油在世界煤成油总量上占主要地位, 而源于石炭—二叠系含煤岩系的煤成油含量很少, 仅有澳大利亚库珀盆地报导的二叠系煤成油。晚石炭世、早二叠世、侏罗纪、白垩纪和早第三纪是地史上五大聚煤期, 石炭系煤主要分布在欧美, 二叠系煤主要分布在澳大利亚、印度、中国和俄罗斯, 白垩系煤主要分布在北美和俄罗斯, 第三系煤主要分布在欧美、远东及新西兰、澳大利亚等。煤成气和煤的富集呈正相关关系, 但煤成油与煤的储量相比并不存在相关的比例, 往往富煤地区并不富油, 绝大多数煤聚集区并未发现煤成油的聚集, 而且在地史上分布也不均匀, 时代越老, 煤成油越少, 如石炭—二叠系煤的储量最大, 但煤成油却并不多见, 这不仅与地质地球化学条件有关, 还与成煤植物、成煤环境等诸多因素有关联。

第二节 煤系烃源岩及油气生成研究现状

综合分析几十年来煤成烃研究成果, 尤其是 20 世纪 80 年代以来的研究成果, 研究进展主要表现在以下几个方面。

一、煤系烃源岩生烃能力的认识

把煤系烃源岩作为重要的天然气源岩进行研究早在 20 世纪 50 年代就开始了 (Karweil, 1956), 以后, 随着研究的深入, 渐渐确定了煤系烃源岩可以形成大量气态烃, 并聚集成大气田的观点 (Brooks 和 Smith, 1967, 1969; Leythaeuser, 1968; Welte, 1969; Stahl, 1968; Teichmüller, 1974; Lutz, 1975; 戴金星, 1980 等), 并建立了判识煤成气的标准和指标 (Stahl, 1974, 1977; 戴金星, 1980; 徐永昌, 1979; 朱家蔚, 1984; 傅家谟, 1990

等)。因此,在对煤系烃源岩是重要的气源岩这一问题的认识上是比较一致的,但对煤系地层有机质是否是有效的油源岩,以及到底是煤的生烃贡献大,还是煤系泥岩贡献大等问题的认识上存在不同看法。20世纪70年代以来,随着荧光分析技术和微区分析技术的逐渐应用和推广,人们对煤系烃源岩生油的认识也不断加深。同时,随着在世界上陆续发现并证实了一些与煤系有关的煤成油田(如 Ekweozor 于 1979 年研究的尼日利亚三角洲平原原油、Philip 于 1981 年研究的澳大利亚吉普斯兰盆地的原油、Hoffman 于 1984 年研究的印度尼西亚马哈卡姆三角洲平原原油等),人们渐渐认识到煤系烃源岩不仅是重要的气源岩,而且也能生油并形成油藏。1990 年美国化学学会有机地球化学分会在波士顿首次召开了“煤成油(又称煤和陆源有机质成油)”专题学术会议,统一了煤系烃源岩能够生油的认识,1998 年在澳大利亚召开的“国际煤成油会议”上,再次肯定了在“白垩纪、第三纪与侏罗纪的煤系烃源岩最有利于生油”。在这种认识的基础上,人们对不同地区、不同地质时代、不同成熟度的煤及显微组分进行了大量生烃模拟实验(如 Berttrand, 1986; Thompson, 1988; Durand, 1983; 杨天宇, 1983; 张文正等, 1983; 傅家谟等, 1986; 徐永昌等, 1978; 金奎励等, 1989; 黄第藩等, 1995 等),证实了煤在热解过程中具有一定的生油能力。在我国,随着近 20 年来西北侏罗系煤系地层中油气勘探获得成功,大大促进了人们对煤成烃的认识和重视程度,可以说,目前人们对煤系烃源岩能够生油这一问题的认识是肯定的,但对能否排烃并聚集成藏等方面还存在分歧,一种观点认为煤系有机质的吸附性大、孔隙小,即使生油也难于排出;另一种观点则认为,由于煤体中孔隙大小是不均一的,并且发育大量的微裂隙,因此,不仅能生油,也能排油。

二、影响煤系烃源岩生烃能力的研究

在实际勘探和研究过程中,人们发现煤系烃源岩的生烃性质变化较大,即使同一盆地,同一时代的煤也是如此。那么,影响煤系烃源岩生烃能力的因素是什么呢?为此,人们从影响煤系烃源岩形成的地质因素,到其中有机显微组分类型、组成、性质及生烃潜力等方面都做了深入地研究,取得的主要进展表现在以下几个方面。

1. 对煤系烃源岩有机显微组分的认识

煤系烃源岩中不同有机显微组分具有不同的生烃能力和烃类组成,为此,人们对煤系烃源岩中有机显微组分的成因、分类、性质做了大量的研究,并把它与有机地球化学、沉积学相结合,形成了有机岩石学这一新的边缘学科。有机岩石学从显微层次上分析沉积有机质的特点、成因、演化及与烃类形成的关系,在此基础上提出了沉积有机质的分类体系。目前,从有机岩石学的角度对沉积有机质的分类较多,但概括起来主要有三种类型:一是全岩分类系统(以 Teichmüller、Ottenjann, 1977; Alpern, 1980; Robert, 1981 等为代表),它是建立在煤岩学研究基础上的;二是干酪根分类系统(以 Burgess, 1974 为代表),以干酪根研究为基础;三是全岩与干酪根相结合的分类系统(以 Senftle, 1985; 金奎励等, 1990 等为代表)。目前,人们对全岩及干酪根中形态有机质的各种特征有了比较统一的认识,但对全岩中亚显微级组分及干酪根中分散无定形有机质的认识还不能统一。

2. 不同显微组分生烃性质的认识

Juntgen、Karweil (1966) 及 Klein (1975) 较早地研究了不同煤岩组分在不同成熟阶段的成气过程。20 世纪 80 年代以来,许多研究者(Durand, 1983; Thompson, 1985; Bertrand, 1986; Mukhopadhyay, 1986; 傅家谟等, 1987; 金奎励等, 1989; 王铁冠等,

1990; 黄第藩等, 1995) 对各种煤及其中的有机组分进行了有机岩石学、有机地球化学和热模拟实验综合研究, 普遍认为, 煤生成气态烃还是液态烃以及生成数量的多少与煤系烃源岩中有机显微组分类型及其含量多少有关。煤系烃源岩中有机显微组分的生烃能力依次为: 壳质组大于镜质组大于惰质组, 因此, 壳质组是煤系烃源岩中主要生烃母质, 它的含量多少直接影响到其生烃能力。但世界上也有一些壳质组含量较低的煤成油气藏, 如澳大利亚库珀盆地二叠系煤中壳质组含量一般小于 14%, 我国吐哈盆地早中侏罗世煤中壳质组含量也小于 10%, 而这些盆地的煤系烃源岩却是主要烃源岩, 由此, 促使人们对煤中主要有机显微组分——镜质组的深入研究。Powell 等 (1984) 根据澳大利亚煤成油的研究认为, 煤中富氢组分含量必须达到 20%~30%, 才能成为有效的生油岩; Hunt (1991) 认为, 煤和陆源干酪根生成并排出油的条件是 H/C 大于 0.9, I_H 大于 200mg/gTOC, 壳质组含量大于 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%以上, 生烃率达 30mg/gTOC 时才能成为有效烃源岩; 傅家谟认为 (1990), 当煤中富氢组分含量在低于 3%~5% 时主要成气, 在 5%~30% 时形成湿气和凝析油, 在 30%~60% 时形成高蜡原油; 黄第藩等 (1995) 根据对我国大量煤样研究认为, 煤中壳质组含量 10% 以上、有机质成熟度达到气—肥煤阶段、干酪根氢指数大于 100mg/gTOC, 这三点是具有重要经济价值的煤成油气田形成的三个必要条件。

大量研究表明, 煤系地层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; 程克明等, 1996; 张鹏飞等, 1997 等), 而基质镜质体中大量超微类脂组及细菌残体的发现则为其具备良好的生烃潜力提供了理论依据 (王飞宇, 1993; 程克明等, 1996 等)。对煤系烃源岩中其它主要生烃母质的研究表明, 各种壳质组组分具有不同的生烃潜力、不同生烃门限和不同产物组成等, 一般来说, 树脂体具有早期生烃的特点 (Teichmüller, 1983; Powell, 1987; 傅家谟, 1987; 黄第藩等, 1987、1989; 王铁冠, 1990; 金奎励等, 1998), 甚至基质镜质体也具备这一特点。孢子体、角质体的生烃相对较晚 (Teichmüller, 1983; 张爱云等, 1990; 程克明等, 1996)。可以这样说, 目前人们对煤系烃源岩中不同类型有机显微组分生烃性质及潜力已有了一定的认识, 存在的主要问题是定量评价各种显微组分含量与生烃量之间的关系。

3. 对不同显微组分化学组成和结构属性的认识

不同显微组分生烃性质及潜力的差异与其化学成分和结构有关, 而科学的发展及高新技术的应用, 也使得人们能够从分子级别上认识显微组分的相关性质。目前, 应用较多的新方法主要有: 显微傅里叶红外、X 射线衍射、气相色谱和质谱、 ^{13}C 核磁共振、电子顺磁共振等, 这些方法的应用大大提高了人们对沉积有机质的化学组成、结构、各种官能团随着沉积环境的变化、热演化程度不同而发生的变化及与生烃关系的认识 (陈德玉, 1977; Astaerlz, 1993; Bustin, 1993, 1997; 秦匡中等, 1990; 金奎励等, 1998; 王延斌, 1998)。但是, 目前对各种技术方法的应用仍未能建立起相应的标准, 在相当程度上仍处于探索阶段。

4. 有机质成熟度对煤成烃的影响

有机质成熟度是影响烃源岩生烃的重要因素之一, 而对煤系烃源岩中各种有机显微组分随着成熟度变化而出现生烃潜力变化的认识与模拟实验及各种先进测试技术应用有关。1983 年, 杨天宇、王涵云等分别对云南柯度先锋、山东黄县的褐煤样品进行热模拟实验; 1986 年, 张惠之等对我国一些特殊煤种和组分进行了单阶段热解模拟实验。此后, 不少研究者分别采用加水模拟、热解—气相色谱和小玻管法对煤及单组分进行模拟实验。所有这些实验和

研究使得人们对煤系烃源岩的生烃机理、生烃过程、生烃潜量及生烃阶段有了直观系统的认识,从而为建立煤成烃模式奠定了基础。

5. 不同成因类型和不同时代的煤系烃源岩对生烃影响

煤系烃源岩的化学性质、有机显微组分类型及含量等都与沉积环境和成煤植物有关,Thomas (1981)研究了澳大利亚陆相植物群演化对陆相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,也能产油的结论。从目前研究结果看,我国煤成油气也主要与侏罗系和第三系煤系烃源岩有关,而古生代煤系基本上以成气为主。关于沉积环境和介质条件对煤系烃源岩的影响,Powell (1984)认为,在中等氧化环境条件下有利于木质素和纤维素降解,并在缺氧条件开始前富氢组分得以富集,从而形成优质的烃源岩层。Thompson (1985)对印度尼西亚马卡母三角洲煤成油进行研究后认为,煤中富含壳质组与该区煤的异地成因有关。近十几年来,随着有机相和层序地层学的引入,把沉积学、有机岩石学、有机地球化学和层序地层学结合起来对烃源岩进行综合研究,促进了人们对沉积环境与烃源岩质量相互关系的认识,并从时空演化的角度来对一个油气盆地内烃源岩质量进行评价。

三、煤成烃模式的建立

在对煤系烃源岩中各种有机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成烃模式进行了研究,Teichmüller (1974)总结了从褐煤到无烟煤各个演化阶段一系列演变特征,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 约为 0.5%,对应着生油窗的起始值;第二次跃变发生在 R_o 约为 1.2%~1.6%,代表着生油窗下限,表示煤成油结束。这一研究结果为煤成烃模式的建立奠定了基础。1982年,Teichmüller 在二次跃变之间又区分出一个生烃高峰期,其 R_o 大约为 0.8%~1.0%,进一步丰富了煤成烃理论。1987年,Murchison 在总结前人成果的基础上,对煤中各种有机显微组分随着成熟度变化而出现的光学性质、烃类的组成及产物特征进行了系统研究,并建立了相关关系,这一成果加深了对煤成烃的认识。结果表明,传统干酪根生油理论中 R_o 大于 1.3%~1.6% 时由油发生裂解形成的凝析油和气在陆相有机质(如树脂体、镜质体和木栓质体等)处于低成熟阶段(R_o 为 0.4%~0.6%)时也可以形成,并将这部分油和气称为“低成熟油气”。因此,对煤系烃源岩及其生烃性研究在理论上突破了传统的干酪根生油理论。在我国,未成熟—低成熟油及煤成油气理论体系的形成更是具有中国特色的陆相生油理论的新进展。

四、煤系烃源岩评价

对煤系烃源岩的评价是一个未能取得统一认识的问题,尽管目前人们对不同煤阶和不同有机显微组分的生烃性质和生烃潜力有了比较统一的认识,并建立了成烃模式,但由于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有机显微组分类型、含量、生烃性质和潜力等方面都有一定的差异,从而使得评价生油岩性能的一些常用地球化学指标和方法很难具有普遍意义。目前常用的评价方法有:①沉积有机相法(傅家谟,1990),这种方法的重点是认为不同类型的有机相是不同类型有机质的共生组合,每种类型的有机相都具有一定的岩石学和地球化学双重属性,因此,那些有利于油气形成的有机相分布区是寻找油气的重点地区;②

有机岩石学法,这种方法的特点是通过对比源岩中有机显微组分的观察定量统计,通过定量和赋值进行评价(Smith, 1987; 傅家谟, 1990 等; 金奎励等, 1997); ③有机地球化学方法,根据每克有机质的液态烃产率(Powell, 1984)、或根据 H/C、O/C 比值进行评价(傅家谟, 1990)、或根据常规生油岩评价指标(刘德汉等, 1987)来评价煤系烃源岩; ④模拟方法,这种方法比较直观,常用的有热压模拟法、加水热压模拟法和热解气相色谱法等。

第三节 煤成烃研究存在的问题

煤成烃研究和勘探历史较短,很多问题有待深入研究,但含煤岩系能形成大中型油气田的事实已引起世界各国对煤成烃研究的高度重视,到目前为止,煤成油气的基本问题,即成煤植物有机质能否生成油气和煤系地层特别是煤层能否排出油气的问题,可以认为已基本上有了肯定的结论,但对煤成烃特别是煤成油理论和实践问题的深入研究,尚不尽善,仍需做大量的工作。这也是当今国内外地质学家们对煤成烃问题的研究重点和趋向,概括起来,主要集中在以下几个方面:

(1) 把有机岩石学和有机地球化学理论、方法更紧密地联系起来,对煤系烃源岩生烃物质进行双重属性的研究,由研究不同煤种的生油潜力逐渐深入到单组分的成烃性能、生烃潜力及热演化规律,进而追溯到各个亚显微组分的成因、原始物质、沉积环境及埋藏条件对生油的影响。以便更全面地认识了解它们,并在两者结合过程中形成新的学科。

(2) 应用先进的技术手段,对煤系烃源岩中超微组分进行成因、赋存、识别、地球化学属性及生烃意义的研究,以便从超微的角度解决目前研究中存在的一些悬而未决的问题。

(3) 加强对煤系烃源岩生排烃机理的研究,以便统一对煤成烃的认识并促进煤成油气田的勘探开发。

(4) 从综合研究入手,研究评价煤系烃源岩的指标及评价理论也是今后发展趋势,在这方面,有机相和层序地层学的引入将是今后的发展方向。

第四节 研究区勘探研究现状及存在问题

东海陆架盆地作为中国东部一个大型中生代沉积盆地,面积约为 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$ 以上,蕴藏有丰富的油气资源。我国从 1958 年开始对东海陆架盆地的地质调查,到目前为止共在该盆地做了二维地震 $20 \times 10^4 \text{ km}^2$ 以上,三维地震 2000 km^2 以上,其中中国海洋石油总公司和原地质矿产部各占一半左右。钻探井和评价井 57 口。除此之外,台湾、日本、韩国和美国还分别在该盆地做了一些勘探工作,台湾中油公司在盆地南部、日本和韩国在盆地北端分别约有钻井 10 多口。通过多年的勘探,已找到一批油气田及含油气的构造(表 1-1)。其中平湖油气田已于 1998 年 11 月 18 日生产原油,1999 年 3 月 26 日生产天然气;1999 年该油气田生产原油为 $55.56 \times 10^4 \text{ t}$,天然气为 $1.66 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。另外,在“九五”期间,分别发现了西湖凹陷的春晓含油气构造和丽水凹陷的丽水 36-1 含油气构造。

迄今为止,中国海洋石油总公司系统地对整个东海陆架盆地的油气资源评价已进行过两次,分别是 1982~1984 年的东海陆架盆地早期油气资源评价及 1989~1993 年的中国近海油气资源再评价。1994 年开始,在东海西部地区开展了第四轮招标,共招出 14 个区块。随后在合作区钻探的 15 口井中,只有最后一口井获得工业性油气流,但却坚定了在丽水、椒江