

教育部跨世纪学术带头人培养计划基金资助

沉积有机质 二次生烃理论 及其应用

秦 勇 等著

地质出版社

教育部跨世纪学术带头人培养计划基金资助

沉积有机质二次生烃理论及其应用

秦 勇 朱炎铭 范炳恒 著
张有生 姜 波 李田忠

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 简 介

通过深入的地质历史分析与地球化学研究,首次较为系统地查明了沉积有机质二次生烃的物质显现规律,深入探讨了其化学反应动力学机制;系统剖析了渤海湾盆地古生界二次生烃的“三史”背景以及古地热场演化历史,系统揭示出古生界沉积有机质的受热—成熟—生烃历史;首次建立起较为完整的烃源岩二次生烃评价方法体系,据此定量探讨了渤海湾盆地古生界二次生烃的时空展布特征,实现了对其有利区带的优选评价。作者在沉积有机质二次生烃基本特性、基础理论、有利区带优选理论与方法等方面所取得的研究成果,为烃源岩二次生烃理论研究开辟了新的途径,也对二次生烃有利区带优选与评价的实践具有推进意义。

本书适合于从事化石能源地质研究的科技人员和研究生阅读参考,对从事石油天然气资源评价的技术人员也具有参考使用价值。

图书在版编目(CIP)数据

沉积有机质二次生烃理论及其应用/秦勇等著.-北京:地质出版社,2001.12

ISBN 7-116-03481-1

I.沉… II.秦… III.有机生油-二次运移-渤海湾-古生代-研究 IV.P618.130.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第084529号

责任编辑:祁向雷 李永海 王 璞

责任校对:李 玫 关风云

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路29号,100083

电 话:(010) 82324508(邮购部);(010) 82324577(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱:zbs@gph.com.cn

传 真:(010) 82310759

印 刷:北京印刷学院实习工厂印刷

开 本:787×1092¹/₁₆

印 张:12.375

字 数:290000

印 数:1—800册

版 次:2001年12月北京第一版·第一次印刷

定 价:30.00元

ISBN 7-116-03481-1/P·2224

(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)

序

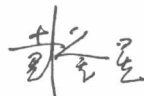
沉积有机质二次生烃现象在我国古生界烃源岩较普遍,深入研究二次生烃的基本特征、探讨其地质与地球化学机理以及构建有效的二次生烃评价方法体系,是寻找新的油气资源、开发新层系和新目标区、扩展以往油气基地前景的一条必经途径。华北地区自古生代以来经历了多期构造运动,中元古界—古生界目前的最大残留厚度超过万米,在漫长而复杂的地质历史中不可避免地会经历二次生烃的作用,而且在一定程度上具备了有利于烃类生成和保存的构造条件与物质基础。本书作者正是立意于这一油气勘探理论与实践的需求,对烃源岩二次生烃的特征和机理开展了长达4年的系统研究,并且将要出版我国第一部关于沉积有机质二次生烃的学术专著,可喜可贺。

事实上,在国内外已发现了多个二次生烃形成油气藏的实例,如阿尔及利亚哈西-迈萨乌德油田、美国俄克拉何马城油田、我国新疆塔里木盆地志留系沥青砂以及渤海湾盆地区苏桥油气藏、文留气藏、孔古3井油气藏等,昭示出我国东部古生界的油气勘探前景。然而,由于二次生烃地质历程复杂、影响因素繁多、特有的地球化学机制尚不清晰,研究程度相对较低,制约了沉积有机质二次生烃理论的发展。同时,我国华北古生界烃源岩生烃的主要期次尚不十分明了,目前对二次生烃迟滞效应的程度和控制因素的研究尚不完善,缺乏有效的二次生烃有利区带评价理论与方法,致使古生界油气勘探目标优选的难度增大。本书作者清醒地认识到上述亟待解决的问题,具有创意地在二次生烃的基本特征、成因机制、评价方法等方面取得了新的研究成果,对丰富发展油气生成理论和支持新层系油气勘探等均有积极意义。

本书的研究内容丰富而系统,其特色主要体现在如下方面:采用自然成熟系列与人工模拟系列对比研究的方法,就沉积有机质二次生烃的基本特征得出了一系列新的发现,并就二次生烃的地球化学机制提出了新的学术观点;基于地质历史分析的思路,结合新的测试手段与方法,合理地恢复了渤海湾盆地区古生界的基础“三史”以及生烃演化历史;以动态演化的观点,揭示出该区古生界沉积有机质二次生烃的特征及其时空展布规律;以二次生烃模拟实验为基础,建立起二次生烃量系列量版;根据对二次生烃地质控制因素与机理的深入剖析,构建了对油气勘探评价具有指导作用的二次生烃有利区带优选方法体系。

本书作者长期致力于沉积有机质特性、成因和烃类生成演化的研究工作,在沉积有机质成熟作用、海相碳酸盐岩油气生成、陆相烃源岩地球化学、煤层气地质理论等方面都取得过一定的研究成果。现在,我又欣喜地看到了作者在烃源岩二次生烃研究方面的新的贡献。衷心祝愿作者们在将来的研究工作中取得更大的进展!

中国科学院院士



2001年6月5日

前 言

对古生界二次生烃潜力的重新认识,是我国华北、华南乃至西北地区新层系油气勘探欲形成新突破的关键问题之一。基于这一战略目标,作者以国家教育部跨世纪学术带头人培养计划基金以及中国石油天然气总公司“九五”重点科技工程项目为依托,结合作者先前在该领域的长期研究工作,对古生界沉积有机质的成烃演化,尤其是对二次生烃的特征和地质机理开展了研究,不仅在沉积有机质二次生烃的历史、数量、油气相态、时空分布规律等方面得出了新的认识,在成生机制方面提出和论证了新的学术观点,而且建立了二次生烃有利区带评价的新的方法体系,目的是为我国油气勘探形成新突破提供科学依据,也对推动沉积有机质生烃理论的发展作出新的贡献。

根据作者的长期研究成果,本书将“二次生烃”定义如下:所谓的二次生烃,系指烃源岩在受热温度降低导致一次生烃历程被终止之后,当受热温度再次增高并达到有机质再次活化所需的临界热动力学条件时,烃源岩发生的再次生烃演化。应予强调的是,由于二次生烃迟滞作用的客观存在,再次活化的临界温度往往不等于一次生烃终止时的温度,二次生烃启动时所需的温度一般要偏高一些。广义上来看,烃源岩在地质历史时期有可能经历过多次的生烃终止与活化,发生三次甚至更多次数的生烃作用。本书将一次生烃之后的历次生烃作用,统称为二次生烃。

本书的创新性成果和特色,主要体现在如下方面:

(1) 采用自然成熟系列与人工模拟系列对比研究的方法,系统查证了沉积有机质二次生烃的基本特征,得出了一系列新的发现,并从化学反应动力学角度就二次生烃的地球化学机制提出了新的学术观点;

(2) 以渤海湾盆地区的五大坳陷为重点,运用动态演化的观点首次报道了在大区域的尺度上对古生界沉积有机质二次生烃的“起始”成熟度、地质时限、临界深度、显著深度及其区域分布特征进行深入而系统的研究成果;

(3) 首次揭示出上述区域目标层系在不同地质时代二次生烃的数量、相态以及有利区带的空间展布规律;

(4) 以二次生烃模拟实验为基础,结合对目标层系构造—埋藏—成熟—受热历史的系统剖析,建立二次生烃有机质起始成熟度—有机质类型—二次生烃迟滞成熟度/深度/温度—二次生烃量之间关系的预测图(量)版;

(5) 从地质历史分析和二次生烃模拟的视角,深入剖析二次生烃的控制因素和地质机理,构建了对油气勘探评价具有指导作用的二次生烃理论与方法体系。

本书由中国矿业大学秦勇教授任主编。书中各章的撰写人员分别为:前言,秦勇;第一章,秦勇、朱炎铭、张有生;第二章,张有生、秦勇;第三章,朱炎铭、姜波;第四章,秦勇;第五章,秦勇、范炳恒;第六章,秦勇。范炳恒教授负责有关图件的分析与编制,李田忠博士完成了计算机成图。古生界生烃演化史的数值模拟由李田忠、朱炎铭博士

完成。姜波、朱炎铭、秦勇、李田忠完成了现场调研、资料收集和样品采集，张有生完成了烃源岩有机岩石学测试，宋党育参与了资料整理分析。在秦勇教授的指导下，朱炎铭、张有生分别完成了关于黄骅凹陷二次生烃构造控制和二次生烃模拟的博士学位论文，李田忠完成了关于济阳凹陷二次生烃特征研究的硕士学位论文。这些都为本书提供了丰富的研究资料。

项目长谯汉生教授和上级专题负责人王兆云博士给予了直接指导，北京石油勘探开发研究院的有关领导和同行给予了热情关怀。研究过程中参考了180余份来自各有关油田的科研报告、勘探成果和内部资料。调研工作得到了胜利、大港、华北、中原、辽河等油田地质研究院的大力支持，梁狄刚教授、程克明教授、何海清博士、陈建平博士、赵长毅博士、关德师教授、袁选俊教授等以及北京石油勘探开发研究院地质研究所、东部研究室等提出了大量宝贵建议。在项目验收中，杨起院士、戴金星院士、韩德馨院士等10余名专家学者对研究成果给予了充分肯定和热情鼓励。样品测试得到了中国矿业大学分析测试中心、北京石油勘探开发研究院分析测试中心、地质科学研究院分析测试中心、中国科学院高能物理研究所、核工业部地质研究院、江苏煤田地质研究所等单位的大力支持，并得到胜利油田地质研究院、江苏油田地质研究院等的无私协助。

承蒙我国著名石油天然气地质学家、中国科学院院士戴金星教授为本书作序，使我们新一代的能源地质工作者倍受鼓舞。地质出版社的编辑对文稿进行了全面细致的编辑工作，为本书的顺利出版付出了大量辛劳。借本书出版之际，谨向上述专家、学者和有关单位致以深深的谢意。

尽管作者十余年来始终在石油天然气有机地球化学及相关研究领域不倦探索，并在烃源岩二次生烃的特征和机理方面取得了一定研究进展，但由于学识和认识阶段性的限制，书中的成果尚不能尽如人意。因此，作者也希望能通过本书的出版，抛砖引玉，在同行中引起更大的共鸣，以推动烃源岩二次生烃研究的深入发展。

主编谨识

2001年5月28日

目 录

序	
前 言	
第一章 研究基础	(1)
第一节 前期研究成果及存在问题	(1)
一、前人及本书作者前期主要认识	(1)
二、尚待解决的主要问题	(2)
第二节 研究流程与主要内容	(3)
一、研究思路与技术路线	(3)
二、主要研究内容	(3)
三、研究工作主要特色	(4)
第三节 地质历史分析方法	(5)
一、沉积-构造分析	(5)
二、热物理学参数分析	(5)
三、有机质成熟-生烃史数值模拟	(9)
第四节 地球化学分析方法	(9)
一、热解生烃模拟	(10)
二、生烃反应动力学分析	(10)
三、显微镜光度术	(11)
第二章 沉积有机质二次生烃显现特征	(13)
第一节 二次生烃有机岩石学特征	(13)
一、热变显微组分及其组合	(13)
二、显微组分光学性质演化	(18)
三、二次生烃沉积有机质显微组分分类	(20)
四、变显微组分及结构形成机理探讨	(22)
第二节 二次生烃有机地球化学特征	(25)
一、样品基本特征	(26)
二、热解生烃率与累积生烃量	(29)
三、热解烃的组成与相态	(34)
四、二次生烃迟滞性特征	(47)
第三节 二次生烃系列量版及换算方法	(50)
一、二次生烃系列量版	(50)
二、二次生烃特征图解方法	(50)
第四节 二次生烃反应动力学探讨	(54)
一、自然成熟系列反应活化能分布与二次生烃	(55)
二、热模拟成熟系列反应活化能分布与二次生烃	(57)

三、二次生烃模式	(62)
四、二次生烃反应动力学机制	(64)
第三章 古生界构造-埋藏历史	(70)
第一节 区域构造背景	(70)
一、区域构造演化历史	(70)
二、区域现代构造格架	(74)
三、区域深部构造格架	(83)
第二节 印支期构造-沉积格局	(87)
一、三叠系厚度及其反演	(88)
二、印支期构造-沉积分异	(90)
三、印支期古生界埋藏特征	(93)
第三节 燕山期及喜马拉雅期构造-沉积格局	(93)
一、燕山期古地质面貌	(93)
二、燕山期构造-沉积分异	(94)
三、燕山期末古生界埋藏特征	(97)
四、喜马拉雅期构造-沉积格局	(97)
第四节 古生界埋藏史类型	(102)
一、古生界埋藏阶段	(102)
二、济阳型埋藏历史	(103)
三、黄骅型埋藏历史	(104)
四、沧县型埋藏历史	(104)
第四章 古生界受热-成熟历史	(107)
第一节 古地热场演化	(107)
一、古地温梯度及其演化	(107)
二、区域古地热场演化模式	(115)
三、古生界受热历史及其分异	(120)
第二节 燕山期异常古地热场成因	(125)
一、异常古地热场发育地质时代的确定	(125)
二、异常高热古地热场的形成机制	(128)
第三节 古生界沉积有机质成熟演化	(133)
一、古生界有机质成熟度“阶梯式”演化	(133)
二、古生界有机质成熟度时空展布	(136)
第五章 古生界二次生烃评价	(143)
第一节 古生界有机质二次生烃特征	(143)
一、古生界有机质二次生烃历程	(143)
二、古生界有机质二次生烃率展布	(150)
三、古生界有机质二次生烃相态展布	(153)
第二节 古生界有机质二次生烃深度	(158)
一、燕山期二次生烃显著深度的现今展布	(158)
二、喜马拉雅期二次生烃显著深度的现今展布	(159)
三、临界深度与显著生烃深度的关系	(167)
第三节 古生界二次生烃有利区带	(170)

一、二次生烃有利区带优选流程、准则与方案 (170)

二、二次生烃有利区带展布 (173)

三、燕山期潜在区带分布 (176)

第六章 主要研究成果 (180)

主要参考文献 (183)

第一章 研究基础

基于大量资料调研,对前期研究成果进行了系统总结,并指出其主要存在着4方面的问题。在此基础上,确定了以基础“三史”和生烃史研究为主线的研究流程,为实现优选二次生烃有利区带这一最终目的奠定了技术保障。采用沉积-构造分析、地质温度计、 $EASY\%R_o$ 数值模拟等地质分析方法,以重建古生界的埋藏历史,确定古地热场热物理参数和恢复古生界受热历史。重点采用热解模拟、化学反应动力学分析、显微镜光度术等有机地球化学手段,为确定古生界沉积有机质成熟度、了解有机岩石学演化规律、查明二次生烃特征、开展二次生烃机理剖析等提供了可靠依据。

第一节 前期研究成果及存在问题

作者先后赴胜利、大港、华北、中原、辽河5个含油气区及胜利油田外围、中原油田外围等地调研采样,并赴北京石油勘探开发研究院、全国地质信息中心、中国煤田地质总局等单位收集有关地质资料。基于对180余份前人资料的总结分析,结合本书作者的前期研究实践,客观地形成了对研究现状的认识,指出所存在的主要问题,为作者的研究明确了主攻方向。

一、前人及本书作者前期主要认识

第一,渤海湾地区上古生界二次生烃起源于强烈断陷导致的深埋作用,发生于燕山期或喜马拉雅期老第三纪和新第三纪。深层原油油气藏主要分布于古生界,并以天然气藏为主,故二次生烃在古生界成烃作用中占有重要地位。

第二,华北上古生界的一次生烃作用受控于巨型拗陷盆地中不同地区地壳的沉降幅度。其中:印支期的构造-沉积分异特征对一次生烃的程度起到了至关重要的控制作用,二次生烃作用是燕山期褶皱-断块盆地和喜马拉雅期大型断陷-拗陷盆地发育的结果,有机质成熟度受控于构造高度分异导致的差异沉降幅度或再次深埋作用。

第三,华北上古生界在印支期末的有机质成熟度在沉降中心附近(如济源断陷)至少已达 $(1.2\% \sim 1.5\%) R_o$,基本上经历了生油窗阶段而开始进入干气阶段,但在盆地周缘一般仅达 $(0.4\% \sim 0.7\%) R_o$,仍处于未成熟阶段或刚进入生油门限。上古生界有机质现今成熟度介于 $(0.6\% \sim 6.0\%) R_o$ 之间,二次生烃作用存在油/湿气生成、油/湿气-干气生成和干气生成三种基本方式,烃类相态在垂向上具有明显的分带性。

第四,华北深层古生界的二次生烃作用主要发生在黄骅、临清、济阳、东濮、济源、黄口-倪丘集、冀中等拗陷(或凹陷)中的部分地区,这部分油气的生成期与构造圈闭形成期配套,应是二次生烃研究及勘探的主要对象。

第五,自燕山期以来,研究区至少经历了七期岩浆-热事件,分别发生于侏罗纪、白

巫纪—老第三纪、新第三纪—第四纪三个地质历史阶段。其中：侏罗纪—白垩纪的岩浆活动在研究区内广泛存在，可能在燕山中—晚期形成区域异常古地热场，并导致古生界烃源岩的大规模二次生烃。

第六，古生界有机质成熟度的空间分布具有“南北分带、东西展布”的总体趋势，高成熟度带的展布与深大断裂带或基底隐伏深大断裂带的分布基本一致，揭示出深大断裂带控制下的岩浆上涌、带中的热对流及带两侧一定影响范围内的热传导对异常古地热场的控制作用。

第七，在古生界二次埋藏期间，有机质成熟作用存在明显的“迟滞”或“钝化”现象。因此，“迟缓”现象对二次生烃深度、数量、油气相态和空间分布的评价预测至关重要，在二次生烃研究中应给予高度关注。

第八，有机质成熟作用和成烃阶段在一定程度上受到有机质的成因类型和埋藏成岩条件的影响。鉴于此因，对有机质成熟度光性标志的选择以及不同成因类型有机质成烃演化特征与演化地质条件之间的匹配关系，应给予足够的重视。

二、尚待解决的主要问题

第一，华北古生界烃源岩生烃的主要期次尚不十分明了，某些结论具有很大的推测性，同一地区不同研究成果往往存在差异。造成这一问题的原因主要在于：①对三叠系原始沉积厚度的恢复存在不同结论，导致对印支期末古生界埋藏深度的认识不一，影响到对生烃演化历程及生烃期主次关系的客观评价；②在强调深埋作用（特别是喜马拉雅期深埋）的同时，普遍地轻视甚至忽视了燕山期区域异常古热场的因素，致使得出二次生烃的前提是二次埋藏必须深于一次埋藏的片面推论。

第二，对下古生界有机质成熟度展布格局和生烃历史（特别是在印支期前）没有明确的概念与认识，原因主要在于两个方面：一是华北地区志留纪—泥盆纪存在较长时间的沉积间断和风化剥蚀，后期经历了多次构造运动的改造与叠加，恢复下古生界的构造埋藏史难度较大；二是缺乏公认的、有效的下古生界有机质成熟度衡量标尺，有机质成熟度不易确定，给模拟下古生界“二次”生烃历程造成极大困难。

第三，对二次生烃“迟滞”效应的程度、地质控制因素的研究尚不完善，由此影响到对主要生烃期次、发生的门限深度、生烃量、生烃-构造-成藏配置关系等的客观认识，使深部油气勘探目标优选的难度增大。尽管某些前期工作在这方面取得了重要进展，但模拟样品的起始成熟度分布不合理，有机质类型不全，其中的某些结论或推论与渤海湾盆地区的一些实例之间存在较大差距。

第四，目前国内普遍采用的热演化史数值模拟方法是 TTI 法，但该法由于将化学反应活化能当做常量看待以及没有考虑小分子的平行化学反应，使得模拟结果与自然演化之间存在较大偏差。尽管国内曾对该法中的某些常量进行了改进而使结果尽可能符合于实际，但方法的实质无法改变。因此，应用原理上更为合理、操作上简便易行的新方法势在必行。

第二节 研究流程与主要内容

针对研究目的,从古生界的基础“三史”入手,在深入剖析古生界生烃史的基础上,为最终查明古生界二次生烃在“四维空间”中的展布特征而构建了切实可行、并具有特色的思路与流程,为研究目的的最终实现提供了保障基础。

一、研究思路与技术路线

生烃史是沉积有机质成熟演化作用的结果,成熟史又取决于受大地构造背景所控制的构造-古地热系统和构造-埋藏系统。因此,烃源岩的埋藏史、受热史、成熟史、生烃史这4种地质发展历史之间,构成了一种“递进控制”的关系。其中:埋藏史和受热史直接受控于区域构造发展史,它们是两种相对独立、但又对成熟史起着共同控制作用的地质历史;生烃史是评价目标的关键体现之一,直接受控于成熟史,间接受到埋藏史和受热史的制约,是基础“三史”作用的必然结果,是评价基础的一种综合体现。

构造分异的作用,在渤海湾盆地不同构造单元乃至同一构造单元不同构造部位,由于古生界的生烃史在二次生烃阶段组合、每一阶段生烃率高低以及最后一次生烃期发生的构造时期等诸方面存在的显著差异。烃源岩再次埋藏过程中显著生烃在成熟度和埋藏深度上明显“迟滞”效应的客观存在,致使上述分异格局进一步复杂化。各类分异综合作用的结果,必定导致古生界二次生烃特征(包括潜力)的现代空间分布具有高度的非均一性。基础“三史”以及生烃史的展布格局及其演化特征,最终构成二次生烃率、二次生烃相态、显著生烃深度等二次生烃特征的现今展布格局。

从基础“三史”以及生烃史入手,查明古生界二次生烃特征的现今展布格局,优选出二次生烃的有利区带,这正是本书所阐述研究工作的最终目的。基于这一研究思路,作者遵循图1-1所示的技术流程实施了研究工作。

二、主要研究内容

上述技术路线或流程中涉及的主要研究内容为:

第一,在重新分析已有成果及勘探资料的基础上,根据盆地构造演化特征,研究古生界的埋藏历史,从构造-埋藏系统的新视角提炼古生界在地质历史时期中的埋藏规律。选择典型单井剖面,系统、定量地查明各相邻构造层,如加里东期/海西期、海西—印支期/燕山期、燕山期/喜马拉雅期之间古生界有机质成熟度的间断或不整合特征。

第二,运用磷灰石裂变径迹、矿物流体包裹体、有机地质温度计等先进方法,结合对区域岩浆活动特征、莫霍面起伏状况等的研究,针对黄骅、冀中、临清、东濮、济阳等主要坳陷,系统确定各构造运动时期的古地热场参数。

第三,采用某些新的有机质成熟度标志(如海相镜质体反射率),对下古生界有机质成熟度进行评价和研究。进而采用地质历史分析方法,查明古生界有机质成熟度定型或二次生烃最后期次的地质年代。引入和开发国际上于20世纪80年代末以来建立的热演化史EASY%R₀数值模拟方法,在更为可信的基础上重建不同地区、不同层系古生界烃源岩沉积有机质的热演化历史。

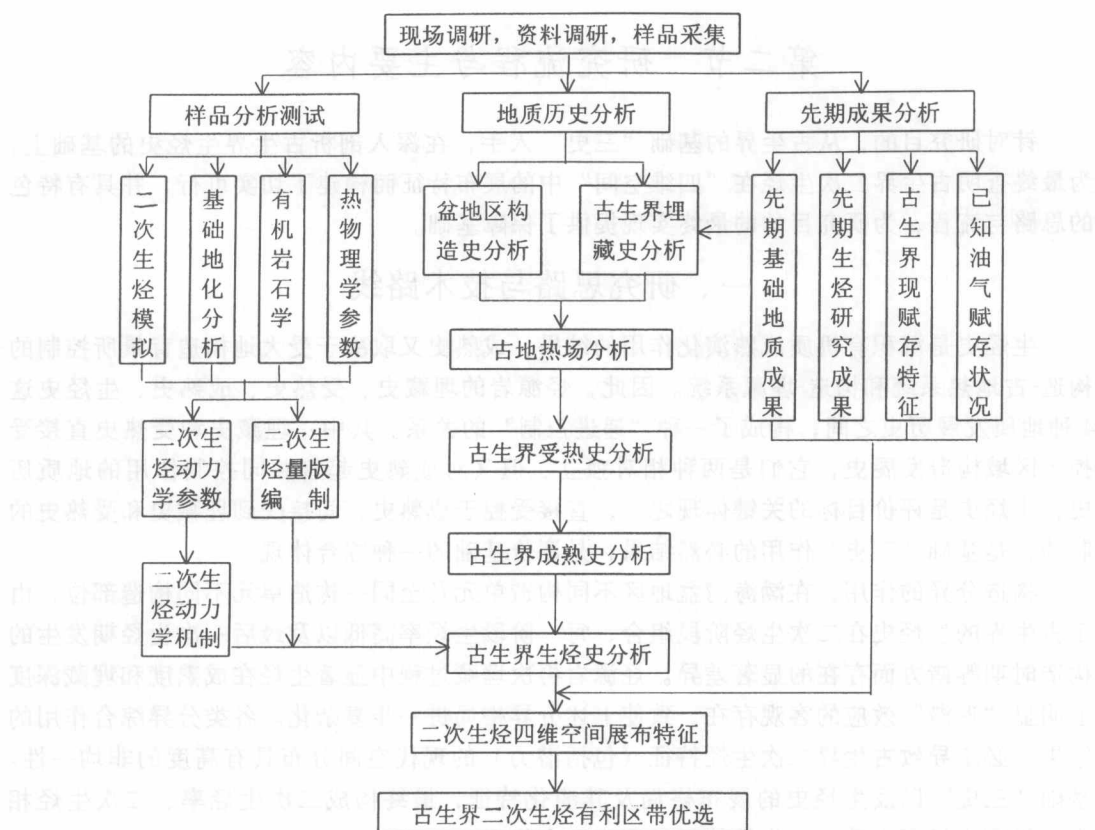


图 1-1 研究实施技术路线示意图

第四，采用热解模拟的方法，全面考虑二次生烃的起始成熟度、主要生烃阶段、有机质类型等因素，开展二次生烃的模拟实验，建立二次生烃有机质起始成熟度—有机质类型—二次生烃迟滞性—二次生烃量之间关系的评价量版。

第五，采用自然剖面与实验模拟相结合的方式，研究古生界二次埋藏过程对沉积有机质演化“迟滞性”及二次生烃的控制特征和机制。系统研究晚古生代以来的构造演化史，尤其是中生代以来的构造分异对古生界差异埋藏的控制作用，阐明区内各构造演化时期的构造-古地热系统及其与古生界成烃演化史、二次生烃作用等之间的因果关系。

第六，综合以上研究成果，剖析古生界二次生烃的程度、规模和时空分布规律，探讨其地质机理，评价古生界有利生烃作用发生的地域、时域、深度、数量和相态，为古生界油气勘探目标的优选提供依据。

三、研究工作主要特色

第一，通过对燕山期古地热场的深入研究，合理确定该期古地热场在古生界烃源岩热演化过程中所起的作用，为主要生烃期次的确定提供关键性依据。

第二，通过对下古生界沉积有机质热演化标志的研究和地质历史分析，在综合确定其有机质成熟度、加里东构造层与海西构造层之间有机质成熟度不整合特征以及筛分或剥离

出后期热演化叠加效应的基础上,确定其一次生烃的特征。

第三,采用自然演化系列与实验模拟系列对比研究的思路,完善和深化对二次生烃基本特征的理解。进而结合典型单井分析,确定不同地区、不同古温压和不同一次成熟度条件下古生界二次生烃的迟滞深度、迟滞时限或二次生烃发生的地质前提条件。

第四,采用 EASY % R_o 法数值模拟与地质历史分析相结合的方式,对古生界受热史、成熟史和生烃史进行更为接近于自然的反演或重建。

第五,综合基础“三史”、生烃史和成因机制的研究成果,通过对有效参数的“递阶优选”,确定古生界构造埋藏—受热—成熟—生烃演化系统的最佳配置关系,实现从地质历史、地域、时域、赋存深度的“四维空间”上对二次生烃有利区带的优选。

第三节 地质历史分析方法

地质历史分析是研究任何与演化有关的地质问题的基本方法。这类基础方法对以基础“三史”和生烃史研究为主线的本书来说,重要性尤为显著。在研究的实施过程中,主要采用了沉积-构造分析来重建古生界的埋藏历史,采用了裂变径迹、矿物流体包裹体、有机显微成分光性标志等分析来确定古地热场的热物理参数,采用了 EASY % R_o 数值模拟方法来恢复古生界的受热历史。

一、沉积-构造分析

沉积盆地从形成到衰亡是一个动态过程。在盆地的不同发展阶段,构造格架、充填沉积构成和内部结构等体现出来的沉积-构造面貌的差异,导致沉积有机质的埋藏史、受热史、成熟史和生烃史呈阶段式发展。在不同的构造演化阶段和构造作用方式下,沉积有机质的生烃演化特征不同。鉴于此因,通过沉积-构造历史的分析,可为沉积有机质的二次生烃演化研究提供大量有用信息。

烃源岩的成熟度演化主要取决于受热时间和受热温度,其中受热温度起着关键性的控制作用。然而,无论古地热场如何变化,烃源岩的受热温度都是通过埋藏特征而得以体现的,而烃源岩自形成以后,所经历的埋藏历史主要受控于构造运动。运用地质历史分析方法,对烃源岩构造-埋藏史、受热史、成熟史进行精确描述,是正确重建烃源岩的生烃演化历史的前提。

上述“三史”的研究,也是评价一个油气盆地的基础。不同大地构造单元中的沉积盆地具有不同的“三史”发展过程,即使是同一沉积盆地,由于构造分异作用的影响,在不同构造部位,其生烃历史也存在着显著的差异。在渤海湾盆地地区古生界沉积有机质的生烃演化过程中,构造分异特别显著,不同的构造发展阶段,甚至同一构造阶段的不同构造部位,古生界的“三史”均有相异的表现形式,导致生烃演化发生区域性分异,使得盆地内古生界的二次生烃体现出明显的阶段性和地域性。

二、热物理学参数分析

古地热场的热物理学参数隐含于沉积岩内的“地质温度计”或“地质压力计”中。对热物理参数的深入研究,是揭示沉积有机质受热演化历程的重要途径。热物理参数可从多

种渠道取得。广义上来看,凡是对地质历史中古地热场温度有指示意义的地质标志,均可作为地质温度计。目前,在沉积盆地古地热场研究中常用的地质温度计主要是沉积岩中的某些热敏感物质或包裹体,包括有机显微组分、自生矿物特征及组合、重矿物等。作者选用当前较为先进实用的方法,如裂变径迹分析、矿物包裹体测温、镜质组反射率光学性质温度反演等,来揭示渤海湾盆地的古地热场演化历史。

(一) 磷灰石裂变径迹分析

自然界中某些放射性元素(如铀和钍)的同位素具有自发裂变的特征,裂变后形成两个运动方向相反但质量相近、且具有很高动能的碎片。裂片在矿物晶格(或其他固体物质)中的运动轨迹,形成比较稳定的辐射损伤区。通过一定的化学试剂对矿物(或固体物质)进行蚀刻,将辐射损伤的痕迹(潜径迹)显示出来,并借助光学显微镜开展观察和分析。

在漫长的地质时期中,自然界矿物中形成的潜径迹几乎都是²³⁸U的自发裂变径迹。这种径迹正是采用裂变径迹法来研究盆地热历史的基础。通常,把这种在地质时期中形成的²³⁸U自发裂变径迹称为古裂变径迹或古径迹。自然界中有许多矿物,如磷灰石、锆石、榍石等都含有裂变径迹。从矿物形成起,其中的铀就会不断自发裂变,潜径迹将随时间积累,并随地质热事件的发生与发展而产生变化。特别重要的是,其稳定性与受热温度之间的关系极为密切,裂变径迹因受热增温而发生衰变或退火。不同矿物中的裂变径迹对温度的

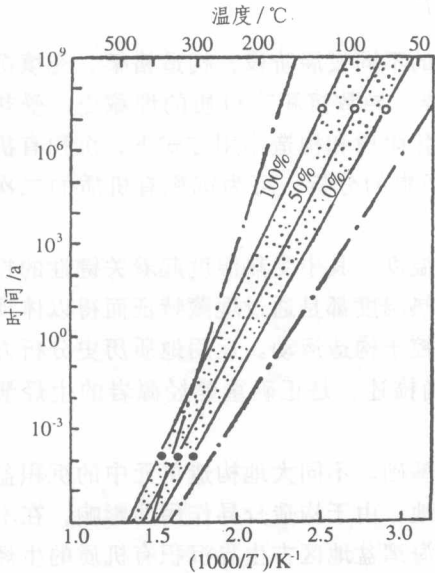


图 1-2 磷灰石古径迹退火的时间-温度关系图解
(据 Naeser 等, 1969; Wanger 等, 1972; 转引自康铁笙等, 1991)
○为地质退火; ●为实验室退火; 虚线是根据实验室退火数据得出的时间-温度关系

敏感程度有所不同,导致退火的温度段也各有差异;退火温度和退火时限的不同,径迹长度缩短和密度减小的程度有所差异。这种特性,为利用裂变径迹方法研究地质热历史提供了理论基础。

退火实验表明,磷灰石中裂变径迹具有长度范围较窄、敏感温度最低的特点(康铁笙等, 1991)。18 个采自不同地区磷灰石样品的诱发裂变径迹平均长度在 15.6 ~ 16.6 μm 之间,平均值为 (16.3 ± 0.9) μm (Gleadow 等, 1986)。此平均值可作为磷灰石诱发裂变径迹平均长度,也即磷灰石中新产生的自发裂变径迹平均长度(康铁笙等, 1991)。磷灰石裂变径迹的退火与受热温度和持续受热时间有关,对于 1Ma、10Ma、100Ma 的地质时间,其退火带温度分别为 90 ~ 150℃、75 ~ 135℃ 和 60 ~ 115℃ (Naeser 等, 1969; Wanger 等, 1972; Gleadow 等, 1983),与石油窗的温度范围基本一致。

通过磷灰石裂变径迹法分析得到的古地温温度较为准确,可以反映不同地质时期古地温变化的特点,并可据此得到关于盆地物质来源、沉积地层形成年代、沉积速率、地层抬升速率、剥蚀厚度等方面的信息,特别是在揭示低温热历史方面具有独到的作用。因此,磷灰石裂变径迹分析技术在油气资

源的评价领域中得到了广泛应用,为油气源岩受热历史的研究提供了重要资料。

裂变径迹退火的温度和时间服从互补原理,故可以通过实验室退火的时间-温度关系来推测地质时间,获得特定地质时限内退火-温度的对应关系。Naeser 等 (1969)、Wanger 等 (1972) 通过实验得到了磷灰石裂变径迹退火时间-温度之间的关系 (图 1-2), 并得出了地质历史时期中磷灰石裂变径迹的退火时间-温度范围窄于实验结果的结论 (康铁笙等, 1991)。因此,采用实验结果来推算地质历史中的退火状况,会有一定的误差。尽管如此,在构造-热史复杂的地区,知道了受热时间,用时间-温度图解来推算温度还是可行的,至少可以揭示样品受热历史的基本状况。

Green (1988) 认为,可蚀刻长度是磷灰石裂变径迹法最基本的反应变量,径迹在一狭窄的可蚀刻长度内生成,一旦生成,在高温条件下就以一定速度缩短,缩短的速率取决于温度高低和已发生的温度减量,同时又有新的径迹不断产生。因此,磷灰石裂变径迹长度的分布特征可以反映所在地区的古热史。磷灰石裂变径迹长度的变化与受热时间、受热温度的关系式为:

$$R = \{L_0 - (L + 0.35 [-4.87 + 0.000168 T \{ \ln(t) + 28.12 \}])^{1/0.35}\}^{1/2.7}$$

式中: $R = L/L_0$, 无量纲; L 为自发裂变径迹长度, μm ; L_0 为诱发裂变径迹长度, μm ; T 为古温度, $^{\circ}\text{C}$; t 为受热时间, Ma 。

在本次研究中,对渤海湾盆地 11 件钻孔岩心样品进行了裂变径迹分析。使用云母外探测器法测定磷灰石及锆石样品的裂变径迹表观年龄,并对不完整古径迹水平投影长度分布进行了偏斜纠正。采用 Zeta 常数法计算裂变径迹年龄,其公式为:

$$T = \lambda_d^{-1} \ln (1 + \zeta g \lambda_d \rho_d \rho_s \rho_i^{-1})$$

年龄误差公式为:

$$\sigma = T [1/N_s + 1/N_i + 1/N_d + (\sigma_\zeta/\zeta)^2]^{-1/2}$$

其中: $\lambda_d = 1.55125 \times 10^{-10} \text{a}^{-1}$, 是 ^{238}U 的衰变常数;

$\zeta = 322.1 \pm 3.6$, 是本次实验磷灰石定年的 Zeta 常数;

($\zeta = 325.6 \pm 5.9$, 是本次实验锆石定年的 Zeta 常数);

ρ_s 为矿物中 ^{238}U 自发裂变径迹密度, N_s 为所测径迹数;

ρ_i 为云母外探测器记录的矿物中 ^{238}U 诱发裂变径迹密度, N_i 为所测径迹数;

ρ_d 为中子注量监测器标准铀玻璃组件的诱发裂变径迹密度, N_d 为所测径迹数;

$g = 0.5$, 为几何因子。

矿物中的裂变径迹是在不同时期产生的,其长度分布反映出矿物受热史的细节,而裂变径迹表观年龄与古径迹退火程度密切相关。如果样品受热史简单,即受一次主热事件后,沉积盆地相对稳定,没有再发生构造运动或其他形式的搬移,则磷灰石裂变径迹长度分布多呈单峰状。地质历史往往是复杂的,样品多经历了若干次构造-热事件的叠加,此时所测的裂变径迹长度分布就较复杂,往往呈双峰或多峰状。同时,裂变径迹长度分布的范围,与径迹的受热时间有关。在相同退火率的情况下,加热时间越长,径迹长度分布越宽。从理论上来说,可从长度分布宽度来估算增温时间,但实际情况要复杂得多,目前尚存有一定难度 (康铁笙等, 1991)。

(二) 矿物流体包裹体分析

矿物流体包裹体中记录着丰富的油气成因信息。因此,矿物流体包裹体研究作为一种新的手段,在油气形成条件分析方面得到了广泛应用(麦碧炯等,1991,1993)。矿物包裹体按成因可分为原生包裹体、次生包裹体和假次生包裹体,按物理状态可分为固体包裹体和流体包裹体。只有原生包裹体形成后与外界基本没有发生物质交换,保留了成矿流体的成分和性质,故可反映矿物形成时的物理化学条件,如温度、压力、成矿溶液盐度和密度、成矿流体来源等。

矿物流体包裹体研究可概括为两大范畴,即包裹体矿物学和包裹体地球化学,主要涉及包裹体类型及分布特征、包裹体显微测温及成岩历史分析、有机包裹体荧光光谱分析、包裹体物质组成等研究内容。包裹体形成温度反映了烃源岩在特定地质时期中的受热温度,形态、大小、产状以及物质组成等反映了地下流体的大致来源,荧光特征中保存着烃类相态、相对形成时期以及运移历史的丰富信息,盐度与温度的组合中蕴涵着烃源岩在特定地质时期埋藏深度的证据。

在本次研究中,通过对38件样品矿物流体包裹体形成温度、盐度、液相组成、气相组成、稳定同位素组成等的分析,为渤海湾盆地古地热场热物理性质确定、古生界受热历史分析、异常高热古地热场成因研究等提供了丰富的信息。

(三) 有机显微成分光性标志反演

与沉积岩中的无机成分相比,有机成分显然对受热环境更为敏感。也就是说,有机显微成分光学性质与最高受热温度之间存在着某种特定的联系。前人为此进行了大量卓有成效的研究工作,分别就镜质组反射率、海相镜质组反射率、沥青反射率、凝源类颜色参数、牙形石颜色指数、动物碎屑反射率、无定形颜色指数等与温度之间的对应关系进行过探讨,并建立起若干应用程度不等的换算公式(Barker等,1986;周中毅等,1992)。但是,只有镜质组在沉积岩中广泛存在而易于寻找,根据其反射率反演出的温度具有可信度高、温度连续的基本特点,这是镜质组反射率目前成为一种精度较高、易于测定、成本低廉的最为有效的“有机地质温度计”的重要原因(秦勇等,1995;杨起,1996)。

镜质组是一种复杂有机缩合物,其基本结构单元由具有烷基侧链及官能团的稠环芳香结构所构成,基本结构单元之间以桥键结构相互关联。在热演化过程中,侧链及官能团脱落,芳香环数目及碳网堆砌层数增加,基本结构单元增大,单元之间有序化程度增高,导致镜质组反射率规律性增大(秦勇,1994)。因此,在镜质组的反射率、化学结构与热演化条件之间,存在着层次不同的因果关系,这种关系可用化学反应动力学原理加以描述。换言之,根据镜质组反射率,有可能定量估算地质体中有机质在热演化历史中的受热条件,进而反演古地热场特征及其演化历史。

镜质组起源于高等植物,然而,高等植物在早古生代尚未出现。也就是说,下古生界沉积岩中没有镜质组可寻,无法利用镜质组反射率来进行受热温度反演。前人为此进行了不懈的努力,海相镜质组的发现与深入研究为解决这一问题提供了新的契机(Lewan, 1987; Buchand等, 1990; 金奎励等, 1992, 1997; 王宇飞, 1995; 杜美利, 1998)。钟宁宁、秦勇等(1995)的研究结果表明,海相镜质组主要由海洋低等生物经海洋腐殖化作用而形成,隶属于原生显微组分范畴,其光学性质及其演化特征与富氢镜质组相似。

钟宁宁和秦勇(1995)进一步就海相镜质组反射率与外源镜质组反射率之间关系进行