

油气地球化学与 成熟探区精细勘探

张林晔 刘庆 徐兴友 李钜源 张守春 等著



石油工业出版社

油气地球化学与 成熟探区精细勘探

张林晔 刘 庆 徐兴友 李钜源 张守春 等著

石油工业出版社

内 容 提 要

本书以中国东部陆相断陷盆地济阳坳陷为例,系统论述了在盆地进入中高勘探阶段后,油气地球化学如何在精细勘探中发挥作用。介绍了烃源岩精细评价的方法,不同环境湖相烃源岩生烃演化的差异、排烃机制、生排烃效率差异及评价方法,建立了特殊油气成因类型地球化学分析技术,通过大量油源对比工作,明确了已探明石油地质储量来源构成,在成烃与成藏关系分析的基础上,总结了不同流体动力系统油气成藏的差异性,为成熟探区油气精细勘探提供了科学依据。

本书可供石油地质科研人员和勘探工作者以及高等院校有机地球化学专业、石油地质专业师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

油气地球化学与成熟探区精细勘探 / 张林晔等著.
北京:石油工业出版社,2015.3
ISBN 978-7-5183-0477-6

I. 油…
II. 张…
III. 油气勘探—地球化学勘探
IV. P618.130.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 254677 号

出版发行:石油工业出版社
(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)
网 址:www.petropub.com
编辑部:(010) 64523544
发行部:(010) 64523620
经 销:全国新华书店
印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2015 年 3 月第 1 版 2015 年 3 月第 1 次印刷
787×1092 毫米 开本:1/16 印张:20.25
字数:510 千字

定价:120.00 元
(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)
版权所有,翻印必究

序

在 20 世纪 80 年代及以前，我国东部的油田勘探正处在方兴未艾的快速发展阶段，有机地球化学与油气地球化学在诸如烃源岩评价、油源对比、主力烃源层研究等方面发挥着重要的作用，烃源岩地球化学研究也为油气勘探部署与几轮油气资源评价提供了可靠的地质—地球化学依据，几乎大多数油田都建立了油气地球化学实验室和（或）研究室。自 90 年代初以来，随着老油田陆续进入油气勘探成熟阶段，曾几何时，在各油田强调增储上产提高经济效益的背景下，对于烃源岩地球化学研究的需求日益减弱，甚至在有的人看来老油田的成熟探区油气地球化学专业已无所事事了，以至于油田的地球化学研究队伍也逐渐萎缩，乃至有的处于被取消的境地。

我怀着非常浓厚的兴趣，有幸提前拜读了由张林晔博士及其研究团队合撰的专著《油气地球化学与成熟探区精细勘探》。多年来，我也曾经在国内地球化学专业会议以及国内举办的国际性学术会议上，多次听到过张林晔博士所作的同样引人入胜的相关学术报告。无论是这部专著，还是作者们在学术会议作的大会报告或专题报告，对于有机地球化学与油气地球化学的学科发展而言，她（他）们通过勤奋工作取得可贵的创新成果回答了这样一个问题：“在经历了以烃源岩评价为主导的发展阶段之后，面对已进入成熟勘探阶段的胜利油田，油气地球化学还能做什么？”实际上，对于我国，特别是东部的老油气田，这是一个具有普遍意义的问题。对于这个问题，张林晔博士与胜利油田的地球化学家、地质家为国内同行树立了一个良好的范例。

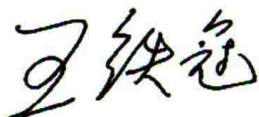
胜利油田地质科学研究院地球化学实验室是于 1964 年春，由当时北京石油科学研究院等院所参加胜利油田石油会战的地球化学家创建的。50 多年来，这个研究团队不仅具有深厚的科学研究积淀与学术底蕴，而且在几代地球化学家的努力下，继续保持和发扬优良的面向油田生产需求、紧密结合勘探开发实践的传统，为早期的油田区域勘探以及现今的成熟探区精细勘探，均作出了突出的贡献，在国内地球化学界及石油行业中都具有相当的影响力。

张林晔是这个研究团队的第三代学科带头人，1977 年她从南京大学化学系毕业后，到胜利油田地质科学研究院地球化学实验室从事同位素地球化学工作，在“七五”天然气国家重点科技攻关项目中崭露头角。1997 年获得工学博士学位后，她回到胜利油田地质科学研究院担任主管地球化学的副总地质师兼地球化学实验室主任。近 20 年来她带领科研团队，在胜利油田成熟探区积极向油田生产靠拢，做到地球化学与测井、地震勘探、钻井工程等研究手段密切结合，对湖相烃源岩重新进行精细评价，探寻优质烃源岩的发育规律与控制因素，在济阳拗陷滩坝和红层分布区，指导低勘探程度区的石油勘探取得重要突破；探寻半咸水—淡水湖相的沙三段与咸水—盐湖相沙四段烃源岩的生烃演化与生烃高峰、生排烃机制和效率的差异，重新厘定断陷湖盆烃源岩的评价标准，成功预测两套烃源层的精

细勘探潜力；在整体系统剖析的基础上，划分、研究东营凹陷三个流体动力系统的分布规律，为针对不同流体动力系统进行精细勘探提供依据，并取得重大效益。

功夫不负有心人，近 20 载的埋头苦干终于进入收获季节，张林晔及其科研团队的工作成果得到胜利油田的充分认可。2013 年，在隆重举行的“胜利油田高效勘探 30 年总结表彰大会”上，张林晔博士荣获“胜利油田高效勘探 30 年十大功勋个人奖”。记得在庆祝大会期间，胜利油田副总经理兼总地质师张善文对我讲：“张林晔她（他）们的工作成果很重要，这些年我们的勘探部署，基本上就是参考了她（他）们的思路干的。”在一个老油田的勘探成熟探区，油气地球化学科研能够取得如此成就，实属难能可贵。

《油气地球化学与成熟探区精细勘探》这部专著，给读者提供了一次分飨其科研思路与成果的良好契机，希望以此为契机，国内地球化学界共同努力，在老油田成熟探区的地球化学科研中，取得更多更大更好的成果，为我国的油气工业作出新的贡献，并走向国际同行的前列。

中国科学院院士 

于中国石油大学（北京）

2014 年 7 月 14 日

前 言

油气地球化学是应用化学原理研究地质体中油气生成、运移、聚集和演变的学科。由于该学科以分析实验为基础，获取信息的微观性和科学性使得人们对于地质问题的分析更为理性和客观。由于其在油气勘探中发挥的重要作用，该学科已经成为油气勘探的重要理论基础，伴随着石油工业的发展油气地球化学经历了形成、丰富和扩展阶段，目前已成为一门独立的学科。

一、实验技术与油气地球化学理论基础

油气地球化学的孕育和诞生始于石油有机成因和无机成因的剧烈争论。德国有机化学家 A. 德莱布斯首次从石油中分离和鉴定出与叶绿素具有相似化学组成和分子结构的含氮有机化合物——卟啉，是有机地球化学发展的重要标志，从此开启了以有机成因说为基础的油气地球化学研究。

20 世纪早中期，苏联和欧美有一批优秀的科学家在从事石油成因的研究工作。苏联科学家通过大量的实验发现活的有机质中常常含有微量烃类，认为这些烃类可能是石油的一部分。Губкин (1937) 认为海洋中动物和植物或是它们的混合物质可以作为石油的母质，生油过程是从有机软泥或生物软泥中开始的，石油分散在黏土淤泥的母岩中，之后在压力作用下与水一起进入多孔的岩层聚集成油藏。Van Tuyl 和 Parker (1941)、Levorson (1954) 以及 Smith (1954) 等的研究工作也发现在现代沉积物中存在类似于原油的烃类组成，因而认为石油的形成温度不是最主要的，而细菌的改造是重要的 (Стадникон, 1937)。在这一时期早期生油说占主导地位。但是，20 世纪中期色谱和质谱技术的应用，人们从沉积岩、原油、现代沉积物和土壤中鉴定出大量有机化合物，使得油气地球化学对于石油形成机制的研究更为深入。对沉积物、生物体和原油正构烷烃的色谱研究发现，现代沉积和生物体中的正构烷烃碳数分布具有奇偶优势，而从原油和古老沉积岩中分离出来的正构烷烃碳数分布不具有奇偶优势 (Bray E E 和 Evans E D, 1961)。通过色谱和质谱分析鉴定技术在芳香烃、甾烷、藿烷等大量生物标志化合物中也发现了两者在分子结构上的差别，而有机质分子结构的差别可能和其经历的热演化有关，上述发现动摇了早期生油说。石油的形成可能并非现代沉积物中低丰度烃类的缓慢聚集，而与有机质在被埋藏的漫长地质历史中经历的热演化有关。20 世纪 60—70 年代欧美科学家开展了大量研究工作 (Abeson, 1963; Philippi, 1965; Vasssoevich 等, 1969; Pusey, 1973)，认为石油的形成存在一个主要阶段，即生油窗，温度大致在 60 ~ 150℃，生油的母质为岩石当中的不溶有机质——干酪根。Tissot 和 Welte (1978) 及 Hunt (1979) 先后发表两部专著，对这一时期的研究工作进行了系统和科学的论述，提出了完整的干酪根晚期降解生油学说。这一学说揭示了油气生成的一般规律，并在世界范围内指导了油气勘探及油气资源远景的评价。但

之后未成熟油和超深液态烃的大量发现表明这一学说还有待进一步的发展和完善。

二、油气地球化学与陆相生油理论

20世纪50年代之前,世界范围内的大中型油气田基本是在海相地层中发现的,以至于人们认为石油的生成和储存仅与海相条件有关(Levorsen, 1967),在这一时期不少地质学家注意到了陆相盆地含油气的事实,中国最早进行了陆相盆地油气勘探实践,并在我国西北地区发现了一系列中小型油气田(谢家荣, 1934; 黄汲清, 1938; 潘钟祥, 1957)。陆相盆地能否发现大油气田仍然受到质疑,但20世纪50—60年代在我国东部松辽盆地和渤海湾盆地陆相地层的勘探突破证实了陆相地层可以形成大规模的油气聚集。如何认识中国陆相生油的基本规律,从而指导陆相地层更大范围的勘探实践是那个时期石油工业面临的重要问题。正是在这种国家需求的大背景下,我国的油气地球化学开始起步,石油工业部和中国科学院分别建立地球化学实验室,对陆相生油问题开展了早期研究(尚慧芸, 1963; 黄第藩等, 1964),油气地球化学从一开始就与石油工业结下了不解之缘(王铁冠, 2008)。进入20世纪70年代,随着大批先进仪器设备的引进,我国油气地球化学得到了快速发展,许多油田和高校相继建立油气地球化学实验室并开展了大量研究工作。在傅家谟院士的主持下,1982年在贵阳召开了“全国第一届有机地球化学会议”,同年傅家谟等出版了我国第一部《有机地球化学》论著,为我国油气地球化学的发展奠定了良好基础。与此同时,以黄第藩为代表的一批著名学者对我国典型的陆相盆地开展了系统的生油研究,这些研究成果系统地分析了中国古湖盆产生的构造背景、古湖泊的类型和生物群的面貌,总结了陆相成烃的规律,并确定了一系列陆相烃源岩评价的参数和标准,这些参数和标准为陆相盆地油气资源评价提供了重要的科学依据(黄第藩等, 1982)。戴金星、徐永昌等著名学者在天然气地球化学方面开展的研究工作对我国天然气工业的发展产生了深远的影响(戴金星等, 1984; 徐永昌等, 1985)。

20世纪80—90年代分子地球化学和有机岩石学取得重要进展使得陆相生油研究工作更为深入(王铁冠, 1990; 肖贤明, 1992; 傅家谟等, 1995),该时期研究工作的最大特点是从分子级层次和显微级层次研究陆相沉积有机质的特征、成因、演化与油气生成的关系。这些研究工作不仅为陆相生油理论提供了更为科学的地球化学依据,同时由于对煤成油和未熟油形成机制的分析进一步丰富和发展了陆相生油理论。以烃源岩为主导的油气地球化学研究工作在这个阶段达到了空前的发展(黄第藩等, 1992; 傅家谟等, 1995; 程克明等, 1995; 王铁冠等, 1995; 侯读杰等, 1995; 陈建平等, 1997; 彭平安等, 1998; 黄第藩等, 2003)。

三、勘探实践与成藏地球化学

油气地球化学经过20世纪80年代的快速发展,伴随着我国第一轮和第二轮油气资源评价的结束,以盆地烃源岩评价为主导的油气地球化学研究工作陷入了低谷。在那个时期,我国许多油田的油气勘探进入快速发展阶段,只要能找到构造,勘探的成功率还是比较高的,地球化学的研究工作似乎无用武之地,因此许多油田的地球化学实验室相继解体,同时国际上一些大石油公司地球化学的研究力量也在削弱,油气地球化学学科发展遭遇瓶颈

期。进入 20 世纪 90 年代，我国东部大油气田构造油气藏勘探阶段基本结束，油气勘探的难度越来越大，未发现的油气藏越来越隐蔽，为了获得良好的勘探效果，勘探家们迫切地想知道油气在何处生成、通过何种渠道、何时在何处聚集。正是这种勘探实践的需求迎来了油气地球化学的扩展期，成藏地球化学得到了快速发展。与此同时，国际上含油气系统概念提出 (Magoon 和 Dow, 1994)，烃类流体从烃源岩到圈闭的地质过程和历史成为石油地质研究的重要方向。

关于油气的生成在早期烃源岩评价中已开展过大量研究工作，但是由于陆相盆地烃源岩的发育常常具有很强的非均质性，哪些烃源岩对成藏真正作过贡献成为成藏地球化学研究的重要内容。如北海油田的地球化学研究工作发现有效烃源岩是 Kimmeridge 富有机质页岩 (Stein 等, 1986)，鄂尔多斯盆地三叠系低渗透油气藏的有效烃源岩是长 7 段优质烃源岩 (杨华等, 2005)。笔者对济阳拗陷做了系统的地球化学研究工作后发现大油田均与沙四上亚段、沙三下亚段有机质富集层有关 (张林晔等, 1999, 2003, 2005)。优质烃源岩在生烃层系中厚度不一定要非常大，但必须具有高有机质丰度 (梁狄刚等, 2000；张水昌等, 2001)，当有机质演化达到一定程度时，易产生超压并形成大油气田 (Hunt, 1990)。秦建中等通过对我国典型湖相烃源岩的沉积环境、有机质含量、有机质类型和有机相、成烃演化机理、生排烃模式及油气运移和聚集规律对比研究，提出了有效烃源岩和富烃页岩是形成大中型油田的物质基础的观点 (秦建中, 2005)。然而，以往我们在湖相生油岩的评价中常常把分布广、厚度大的烃源岩作为主力烃源岩评价，比较重视烃源岩的厚度，应用大平均的方法求取烃源岩的有机质丰度进行资源评估，忽略了优质烃源岩的发育对大油气田形成的控制作用，有效烃源岩与成藏之间的关系分析较为薄弱。

油气自烃源岩生成后经历怎样的地质过程最终到达油气聚集的终点——油气藏，虽然这一地质历史过程早已逝去，无法直接观察和研究，但是油气地球化学的研究发现，含烃流体在运移的过程中其本身和对周围的环境都产生了影响并留下了蛛丝马迹 (刘文汇, 2000；李明诚, 2004)，人们可以通过油气地球化学研究手段分析油气成藏的过程并再现它的历史。运用油气地球化学技术手段判断油气运移方向主要是基于原油中不同组成和不同结构的有机化合物的地质色层效应，早期用于研究油气运移方向的地球化学指标主要是烃类含量、热解参数及不同分子质量饱和烃、芳香烃和甾烷异构化参数比值，由于这些指标的多解性，在运用的过程中常常具有一定的局限性 (Seifert 等, 1981；汪本善等, 1994)。20 世纪 90 年代开发的含氮化合物地球化学分析技术，利用含有氮原子杂环的卟啉类化合物的地质色层效应在油气运移的研究中见到较好的效果，并在不同类型的盆地中得到了广泛应用 (Li 等, 1992；Yamamoto 等, 1991；王铁冠等, 2000；冯子辉等, 2003；肖中尧等, 2003)。近年来的研究工作发现，石油中的烷基二苯并噻吩类多环芳香烃化合物在运移的过程中具有分馏效应，可以示踪油藏充注的方向和途径，该类化合物主要存在于芳香烃馏分中，可以应用于不同成熟度的原油，尤其是较为缺乏有效分子参数的高成熟—过成熟原油和遭受过生物降解原油的运移示踪，已在我国塔里木盆地海相地层和北部湾盆地、辽河拗陷陆相地层取得良好的运用效果 (王铁冠等, 2005；李美俊等, 2008)。但是油气在运聚的过程中遭受的次生变化及有机与无机的相互作用对油气的分子组成和相态产生的影响仍然有许多研究工作有待深入 (黄海平等, 2001, 2002；张枝焕等, 2003；包建平等,

2008)。

关于油气生排和运聚时间的判断，由于生烃动力学、热模拟实验、成岩矿物同位素、包裹体等分析技术的引入，使得对其进行动态和历史的评价成为可能（卢双舫，1996；庞雄奇，1995；王飞宇等，2002；钟宁宁等，2002；彭平安等，2008）。而对于成烃到成藏过程含烃流体运移的驱动机制和流动样式的研究，由于地球化学与其他学科的结合而取得了重要进展，人们认识到油气成烃与成藏的过程实质上是一个能量积累和释放的过程，油气最终聚集的地点是在油气运移的路径上能量达到平衡的任何圈闭中。在这个过程中温度压力是重要的外部条件，而温度压力的变化与盆地的整体沉降和抬升有关并受地质突发事件的影响（关德范等，2004；郝芳，2005；金之钧等，2003；邱楠生等，2000；孙永革等，1995；金强等，1998）。

油气地球化学学科的发展，使得令地质学家长期困惑的油气是如何生成又是怎样聚集成藏两大石油地质问题的认识程度取得了长足的进展，但是任何学科和学说都不能穷尽真理，而只是开辟了通往真理之路。勘探是以找油气为目标的，所谓找，说明我们的工作目标具有一定的隐蔽性和不确定性，地下条件的复杂性和多样性，造成我们无法全面了解地下真实的油气藏，使得油气地球化学在揭示不同地质问题的过程中仍面临许多挑战。笔者长期在勘探一线从事油气地球化学研究工作，深知勘探实践对于地球化学工作者的要求，通过地球化学研究工作不仅仅要阐述已发现油气藏形成的基本规律，更重要的是要预测未被发现油气藏的勘探方向。在一个探区的勘探形势图上如何把空白区涂成红色是油气地球化学工作者的重要目标，油气地球化学只有和生产紧密结合才会有生命力。

胜利油田油气地球化学实验室初建于20世纪60年代，是我国最早的油气地球化学实验室之一，伴随着我国油气地球化学学科的成长，胜利油田油气地球化学实验室走过了建立—发展—低谷—再发展的过程，尤其在20世纪80—90年代，油气地球化学在经历了以烃源岩评价为主导的发展阶段后，面对已进入成熟勘探阶段的胜利油田，油气地球化学还能做什么？在经历了困惑和彷徨之后，我们密切地关注和分析勘探成功和失败的实例，发现在油气成藏的每个环节都有地球化学问题需要解决，正是这种向生产积极靠拢的理念使我们看到了油气地球化学在成熟探区进一步发展的生机。在研究的过程中我们重视微观和宏观的结合，有机和无机的结合，静态和动态的结合。经过多年的发展，油气地球化学已成为胜利油田进行精细勘探的重要工具和基础。基于油气地球化学在成熟探区精细勘探阶段发挥的作用编写了此书，包括以下主要内容。

(1) 湖相烃源岩的精细评价。以烃源岩的微观地球化学研究为基础，结合测井、地震等研究手段，建立了具有预测功能和可操作性强的湖相烃源岩沉积有机相分类方法。以此为基础，对济阳拗陷湖相烃源岩的分布进行了精细评价，明确了济阳拗陷古近系优质烃源岩发育的规律和控制因素，在此基础上，提出了济阳拗陷“勘探层系下沉，勘探区带东移”的建议，上述认识为济阳拗陷古近系滩坝砂和红层的大规模勘探提供了重要理论依据，并指导了济阳拗陷东部低勘探程度地区如青东凹陷、富林洼陷等地区的勘探突破。

(2) 不同环境湖相烃源岩生烃演化的差异性。通过自然演化剖面、物理模拟实验、有机质的化学组成和显微特征等研究发现，不同环境湖相烃源岩生烃演化存在差异性。半咸—微咸—淡水环境湖相烃源岩（济阳拗陷沙三段烃源岩），其生烃产率曲线呈单峰形，大

规模生烃在埋深 3500m 左右。而咸水—盐湖环境湖相烃源岩（济阳拗陷沙四段烃源岩），其生烃产率曲线呈双峰形，存在早期和晚期两个重要的成烃阶段：分别在 2500m 和 3500m 达到生烃高峰。不同环境湖相烃源岩生烃演化存在差异性的原因是由于烃源岩有机质组成和结构的差异造成的。沙四段烃源岩中有机质以非共价键键合方式为主，约占 79%，而沙三段烃源岩中有机质的键合方式以共价键为主（约 70%），两种烃源岩有机质化学组成结构的差异决定了其生烃动力学参数的差异，进而对生烃过程产生重要影响。

(3) 不同环境湖相烃源岩生排烃机制和生排烃效率。运用有机地球化学与无机地球化学相结合的研究方法，系统分析了湖相烃源岩中两种主要矿物，即黏土和碳酸盐矿物的成岩演化、力学性质演化及烃源岩和地层流体的相互作用，结合烃源岩含油饱和度和温压环境的变化研究了烃源岩排烃的动力、通道。把含烃流体的排驱划分成三个阶段：自由排水阶段、烃类能量积累阶段和微裂缝排烃阶段，并进一步分析了构造稳定期和构造活动期排烃方式的差异性。运用自然演化—物质平衡法，结合新钻取心样品的冷冻保鲜地球化学前处理技术，开展了烃源岩排烃效率研究工作，在此基础上重新厘定了陆相断陷盆地湖相烃源岩有机质丰度评价标准。

(4) 已探明储量成因来源分析。本着从已知到未知的研究思路，对济阳拗陷已探明石油储量的成因来源进行了系统分析，目的是通过已探明石油储量成烃与成藏关系的分析，预测未探明储量可能分布的地区。针对陆相断陷盆地原油类型复杂多样，油气往往具有多源供烃、多期成藏并且次生变化和混合现象普遍存在等特点，建立了特殊类型油气成因判识地球化学分析技术，解决了稠油、轻质油、高蜡油和混源油成因来源的判识问题，通过大量油源对比工作，明确了济阳拗陷已探明储量的来源构成和基本成藏模式。目前济阳拗陷已经探明的石油地质储量主要来自沙四上亚段和沙三下亚段有机质富集层，但在不同凹陷两套烃源岩的贡献有差别，对成藏贡献大小取决于两套烃源岩在各凹陷发育的规模和成熟度。沟通两套烃源岩的断裂带是油气向上运移的主要通道，距断裂带越近，油气越富集，沙四上亚段和沙三下亚段上覆沙三段中泥岩厚度大，分布范围广，且广泛存在超压，在没有垂向断裂作为运移通道的情况下，沙四上亚段和沙三下亚段烃源岩生成的油气难以在垂向上发生运移。在这种情况下，油气发生侧向运移和向下运移的概率逐渐变大，这就为油气在烃源岩层内及下伏储层中聚集成藏提供了良好的条件，因此与两套烃源岩邻接的各类碎屑岩和碳酸盐岩储集体，包括泥页岩本身及前古近系潜山都具有较大的勘探潜力。

(5) 不同流体动力系统油气成藏的差异性与精细勘探。在对济阳拗陷古近系开展了上述系统的地球化学研究工作的基础上，以东营凹陷为例，对凹陷的整体流体系统进行研究，进一步分析不同流体动力系统油气成藏的差异性，以期精细勘探提供依据。运用地球化学与石油地质相结合的研究方法，将东营凹陷古近系划分为三个流体动力系统，即常压开放流体动力系统、过渡带流体动力系统和超压封闭流体动力系统。分别研究了不同流体动力系统油气运移的驱动类型和机制。研究表明，三个不同流体动力系统成藏存在差异性。常压开放流体动力系统，流体中的含油饱和度较低，油气运移的动力主要为浮力，而低含油饱和度流体在圈闭内大量富集，可以逐步形成较高含油饱和度的油藏。过渡带流体动力系统，流体的含油饱和度变化较大，既有高含油饱和度流体，又有低含油饱和度流体，但主体为稳态流动的低饱和度含烃流体，运移动力以浮力为主。在常压开放和过渡带流体动

力系统，烃源岩排出的高矿化度沉积—埋藏水与含烃流体往往具有相似的运移途径，因此，在较高矿化度的水型分布区是油气运移的富集区。它们往往分布在与烃源岩沟通的断裂带附近及与烃源岩沟通的古潜山内。应加强这些区带的勘探，以发现新的油气储量。超压封闭流体动力系统，在烃源岩层内及附近，为高含油饱和度流体充注区，烃源岩幕式排出的高含油饱和度流体，在高压驱动下呈活塞式推进运移，容易形成叠合连片的大面积分布的连续型油藏，由于成藏动力较高，会大大降低储层物性下限，极低孔渗的致密砂岩、碳酸盐岩也可以作为油气的有利储层；并且在高压封闭带内，泥岩裂缝较为发育，裂缝不仅为油气流体运移提供通道条件，也可以储存大量油气成为泥页岩裂缝型油藏。另外，由于该深度下烃源岩本身具有较高含油饱和度，因此烃源岩内应残留大量的油气资源，以页岩油气藏形式存在。在超压封闭流体动力系统中，勘探程度相对较低，而那些连续型致密砂岩、泥页岩以及与烃源岩接触的潜山等将成为勘探的最有利区。进一步的油气发现应针对不同流体动力系统成藏的差异进行精细勘探。

全书共分为六章，具体分工如下：前言由张林晔执笔，第一章由刘庆、张林晔、徐兴友、朱日房执笔；第二章由张林晔、张守春、李钜源、刘庆执笔；第三章由张林晔、刘庆、张守春、包友书执笔；第四章由刘庆、徐兴友、张守春、朱日房执笔；第五章由张林晔、徐兴友、李钜源、刘庆、王茹执笔；第六章由张林晔、李钜源、包友书、刘庆执笔，全书由张林晔统稿。

吕慧、陈志林、孔祥星、唐洪三、刘俊明等参加了第五章部分研究工作，李晓燕、银燕参加了第六章部分研究工作。苗得玉、江晓军、李政、张学军、徐大庆等在研究工作中给予了帮助。本书的分析测试工作主要由胜利油田地质科学研究院测试中心完成。

本书为胜利油田地球化学团队多年来研究成果的总结，以胜利油田地质科学研究院周光甲副院长、洪志华副总地质师、廖永胜副总地质师、张春荣高级工程师等为代表的一批老专家为胜利油田地球化学学科发展奠定了良好的基础。值此书出版之际，向老前辈表示崇高的敬意！

在多年的研究工作中，孙焕泉教授、潘元林教授、张善文教授、宋国奇教授、刘显太教授、隋风贵教授、王永诗教授、关德范教授、黄第藩教授、王铁冠院士、彭平安院士、陆现彩教授、卢双舫教授、侯读杰教授、孙永革教授、张金功教授、张在龙教授等给予了热情的支持、指导和帮助，在此一并表示诚挚的感谢！

由于笔者水平所限，书中错误之处难免，敬请专家和读者批评指正。

目 录

第一章 湖相烃源岩精细评价	1
第一节 湖相烃源岩发育.....	1
一、湖盆演化与烃源岩的形成	1
二、湖相烃源岩有机质来源及形成模式	5
第二节 湖相烃源岩沉积有机相研究.....	17
一、沉积有机相划分方法概述	17
二、烃源岩沉积有机相划分	20
第三节 湖相烃源岩沉积有机相测井评价.....	30
一、烃源岩测井评价研究概述	30
二、湖相烃源岩沉积有机相测井响应特征及评价	31
第四节 湖相烃源岩沉积有机相评价与勘探方向预测.....	40
一、济阳拗陷湖相烃源岩沉积有机相评价	40
二、烃源岩沉积有机相分布特征与勘探方向预测	55
第二章 不同环境湖相烃源岩生烃演化的差异性	61
第一节 不同湖相烃源岩自然演化特征及其生烃差异.....	61
一、咸化湖相烃源岩自然演化特征	61
二、半咸—微咸湖相烃源岩自然演化特征	64
三、微咸—淡水湖相烃源岩自然演化特征	64
四、不同环境湖相烃源岩自然演化及生烃差异性	65
第二节 不同环境湖相烃源岩生烃物理模拟实验.....	67
一、模拟装置及实验流程	67
二、模拟数据分析	68
第三节 不同环境湖相烃源岩生烃模式.....	71
一、微咸—淡水湖相烃源岩生烃模式	71
二、半咸—微咸湖相烃源岩生烃模式	72
三、咸化—盐湖相烃源岩生烃模式	72
第四节 多元复合抽提实验及湖相烃源岩生烃演化机制.....	72
一、湖相烃源岩样品采集及多元复合抽提实验	72
二、实验结果与湖相烃源岩有机质化学组成及结合方式分析	73
三、湖相烃源岩有机质结合方式与生烃演化差异性	81
第三章 湖相烃源岩排烃机制研究	82
第一节 湖相烃源岩成岩作用及力学性质的演化.....	82

一、湖相烃源岩矿物组成	82
二、湖相烃源岩中黏土矿物的成岩演化	83
三、湖相烃源岩中碳酸盐矿物的成岩演化	84
四、湖相烃源岩力学性质的演化	85
第二节 湖相烃源岩埋藏演化过程流体成分的变化	88
一、烃源岩有机质演化与酸性物质的生成	89
二、烃源岩矿物转化与金属离子的生成	91
第三节 湖相烃源岩排烃的动力	91
一、烃源岩排烃动力研究概述	91
二、湖相烃源岩排烃动力分布特征	92
三、湖相烃源岩排烃动力主控因素及动力系统划分	94
第四节 湖相烃源岩排烃的通道	96
一、湖相烃源岩孔隙结构变化	96
二、湖相烃源岩微裂隙发育特征	98
三、湖相烃源岩有机质网络发育特征	105
第五节 烃源岩排出流体的相态及含油饱和度变化	108
一、烃源岩排出流体相态变化特征	108
二、烃源岩排出流体含油饱和度变化特征	115
三、东营凹陷烃源岩生排烃流体特征一般变化规律	122
第六节 湖相烃源岩排烃模式和排烃过程	123
一、湖相烃源岩的排烃模式	123
二、湖相烃源岩的排烃过程	127
第四章 湖相烃源岩生排烃效率研究	131
第一节 烃源岩原始有机质丰度恢复和生排烃效率定量计算研究进展	132
第二节 湖相优质烃源岩原始有机质丰度恢复和生排烃效率定量计算	135
一、参数的选取及实验方法的改进	135
二、湖相烃源岩原始有机质丰度恢复和生排烃效率计算	140
第三节 湖相烃源岩评价标准	146
一、烃源岩评价标准概述	146
二、烃源岩评价标准的重新厘定	148
第五章 已探明储量成因来源分析	151
第一节 特殊油气成因来源判识技术研究	151
一、钒离子催化氧化技术及稠油成因来源判识	151
二、高演化油气成因来源判识技术	154
三、高蜡油的成因来源分析	161
四、混源油成因来源定量分析技术	173
第二节 不同烃源岩生物标志化合物特征	185
一、沙四段烃源岩生物标志化合物特征	186

二、沙三段烃源岩生物标志化合物特征	189
三、沙一段烃源岩生物标志化合物特征	191
第三节 原油性质及成因类型划分	192
一、原油物理化学特征	192
二、原油成因类型及其分布	195
第四节 济阳坳陷已探明储量成因来源构成	202
一、东营凹陷已探明储量来源构成	202
二、沾化凹陷已探明储量来源构成	205
三、车镇凹陷已探明储量来源构成	207
四、惠民凹陷已探明储量来源构成	208
五、已探明储量分布的主要控制因素	208
第六章 不同流体动力系统油气成藏差异与精细勘探	213
第一节 地层流体化学特征与分布	213
一、地层水性质与分布特征	213
二、储层烃类的性质及分布特征	216
第二节 地层流体动力特征与动力系统划分	228
一、地层压力特征	228
二、地层水水头大小及其分布特征	240
三、地层流体动力系统划分	246
第三节 不同流体系统成藏动力差异	251
一、浮力在成藏中的作用及有效性	251
二、毛细管压力差在成藏中的作用及有效性	259
三、异常压力在成藏中的作用及有效性	265
四、不同流体系统内成藏的主要动力	270
第四节 地层流体的驱动机制与油气富集	270
一、含烃流体流动样式模拟实验及分析	270
二、含烃流体富集成藏模式	274
三、含烃流体驱动机制与富集模式空间组合	278
四、不同富集模式模拟实验及富集主控因素分析	281
五、含烃流体运移富集规律与精细勘探方向	286
参考文献	293

第一章 湖相烃源岩精细评价

在中国东部古近系沉积时期，受构造运动和古气候的影响，湖泊沉积物分布较为广泛。其中的一系列中、新生代陆相断陷—坳陷型盆地中，广泛发育巨厚层湖相泥质烃源岩。与海洋沉积物相比，由于湖盆规模相对较小，受气候影响明显，当气候发生变化时会导致湖平面、可容纳空间的变化，因而湖泊沉积物纵向上往往表现出较强的旋回性和非均质性。在早期的油气勘探中，一直把分布广、厚度大的“分散有机质”烃源岩作为区内的主力烃源岩。由于地质学家往往笼统地将所有暗色泥岩层均作为烃源岩进行评价，结果造成“单纯追求生油岩的厚度，应用大平均的方法代表有机质的丰度值，从一定程度上掩盖了区内富集烃源岩的贡献”（王秉海等，1992），夸大了中、低丰度烃源岩的贡献。“十五”以来，越来越多的研究表明，优质烃源岩是富油凹陷成藏的主要贡献者。然而，由于湖相烃源岩的非均质性较强，单纯依靠常规的地球化学方法很难对烃源岩作出客观的评价。本章以济阳坳陷为例，重点阐述如何综合运用地球化学、沉积学、岩石学和测井技术手段对烃源岩进行客观的评价和分布规律预测。

第一节 湖相烃源岩发育

一、湖盆演化与烃源岩的形成

构造运动和气候变化是决定湖盆类型的重要因素。对于陆相断陷盆地而言，构造运动尤其是断裂活动控制着盆地古地理面貌，决定着盆地蓄水空间的形成与消亡，是湖盆形成的决定性因素；气候的变化控制着降雨量和蒸发水量，从而控制着河水的注入以及沉积物的供应，进一步影响着湖平面的变化。

Caroll 等（1999）在系统研究和对比了大量现代和古代湖相沉积物的基础上，认为沉积物 + 水的供应速率与潜在可容纳空间的增长速率之间的相对平衡控制了湖泊的发育、分布、特征和层序结构，并对湖相盆地进行了成因分类，划分出过补偿、均衡补偿和欠补偿三种基本类型（图 1-1）。这三种湖相盆地类型在层序结构、湖泊水文学特征、岩性组合和烃源岩发育等方面，各自具有不同的特点。该分类方案为湖盆类型划分提供了一个很好的框架。

中国东部新生代断陷盆地充填演化可划分为三个阶段：早期裂陷充填、中期断陷充填以及晚期的裂后充填，而烃源岩主要形成于中期断陷充填阶段。纵向上，湖盆演化表现出明显的阶段性和有序性，总体可划分为盆地演化早期的过补偿湖盆、中期的欠补偿和均衡补偿湖盆以及晚期的过补偿湖盆几个阶段，不同阶段烃源岩特征存在明显的差异。下面以东营凹陷为例加以分析（图 1-2）。

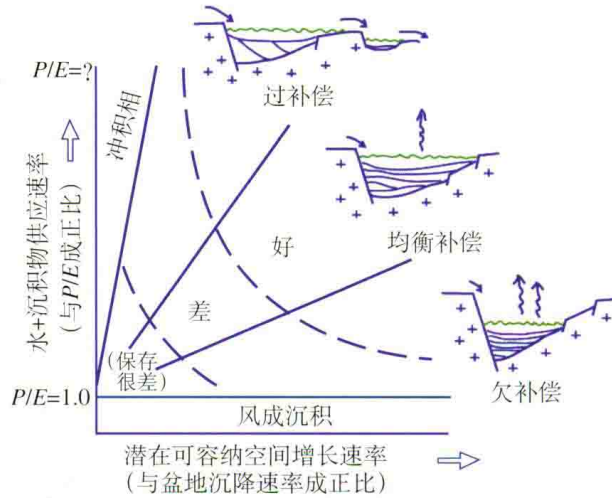


图 1-1 盆地类型模式图 (据 Carroll 等, 1999)

P/E —降水量 / 蒸发量

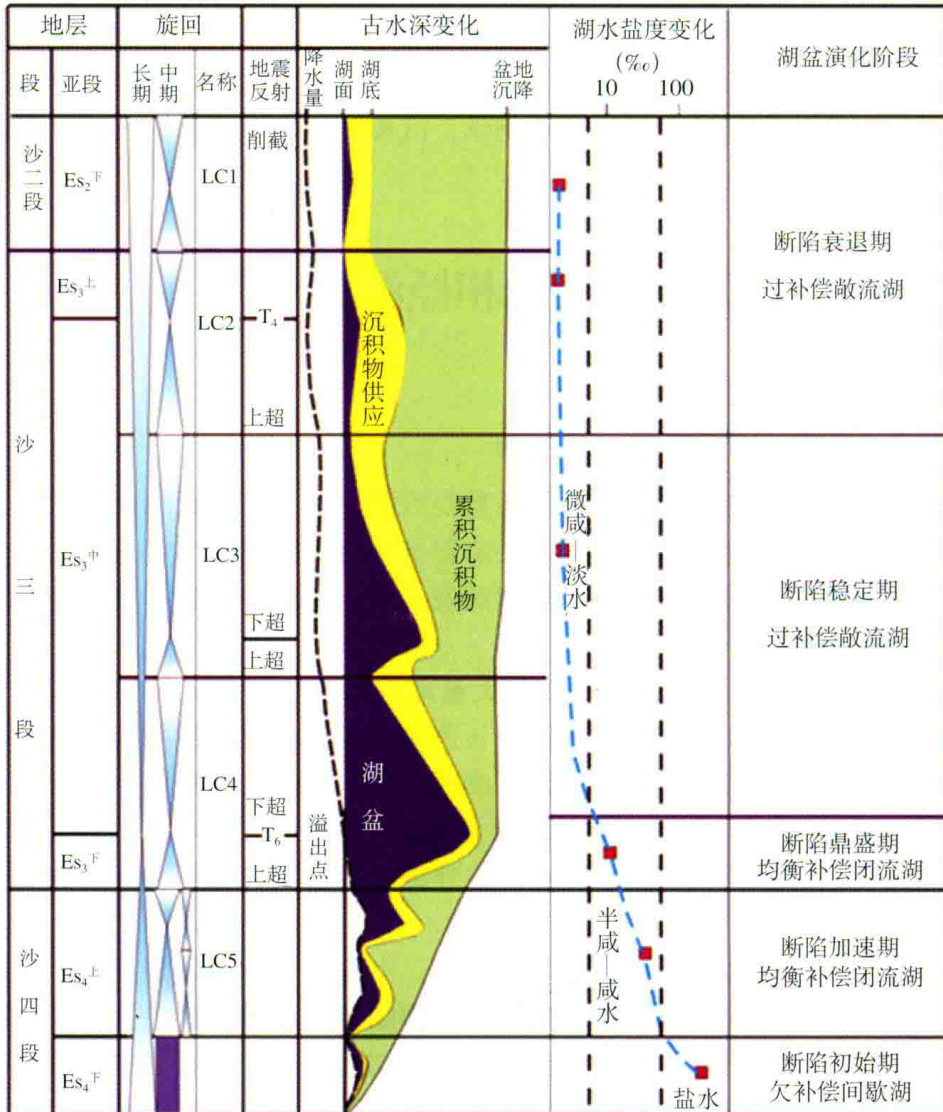


图 1-2 东营凹陷沙四下亚段—沙二下亚段湖盆演化模式图 (据张林晔等, 2005, 修改)

1. 断陷初始期欠补偿湖盆（孔店组—沙四下亚段）

孔店组—沙四段沉积早期，盆地尚处于断陷活动的早期，气候干旱或半干旱，降水量远远小于蒸发量，以河流冲积红层沉积为主；沙四段沉积中期，降水量有所增加，盆地中北部深洼陷带内部开始汇水，形成间歇性盐湖沉积，岩性以厚层的盐岩、膏岩和含膏泥岩为主，局部见杂卤石和钙芒硝矿物。根据蒸发盐矿物组合特征分析，卤水浓缩可达石盐沉淀晚期和钠镁硫酸盐沉淀早期阶段，盐度最高可达 300‰ 左右。在间歇性盐湖较发育阶段，盐湖中心部位形成暗色烃源岩沉积。

2. 断陷加速期均衡补偿湖盆（沙四上亚段）

沙四上亚段沉积时期，断陷活动开始逐渐加强，气候开始转向湿润，降水量开始增加，湖平面逐步上升，并迅速淹没了凹陷宽缓的南斜坡和较陡的北斜坡。该期潜在可容纳空间的变化从早期的持续超过沉积物 + 水的供应到晚期的基本均衡，实现了季节性盐湖向永久性湖泊的转化，湖泊总体表现为封闭式水文特征。沙四上亚段沉积物中原生白云石含量较高，局部夹有含膏泥岩。在广大的南斜坡地区，钙片页岩中见有大量的颗石藻化石。湖水演化总体处于碳酸盐矿物沉淀阶段或碳酸盐与硫酸盐沉淀的过渡阶段。尽管盐度有一定程度的下降，但仍比正常海水盐度（35‰）偏高。根据对西部平方王地区沙四段上部藻礁分析，多细胞生物虽然数量很大，局部形成腹足或介形虫介壳灰岩，但生物多样性明显十分单调，即主要只有腹足类、介形虫和蠕虫类等生物。此外，藻礁中早期碳酸盐胶结作用非常强烈，说明水体盐度仍然偏高。综合蒸发盐矿物组合、古生物组合和硼元素古盐度分析，总体认为古盐度在 35‰ ~ 50‰ 之间，属于咸水环境。沙四上亚段由于盐跃层的存在，湖水经常存在盐度分层，底部长期处于强还原环境，有利于有机质的保存和优质烃源岩的形成。

3. 断陷鼎盛期均衡补偿湖盆（沙三下亚段）

沙三下亚段沉积时期，东营凹陷断陷活动迅速加强，盆地沉降很快，同时气候湿润，大量淡水注入，携带矿物质进入湖盆，导致水体变深。但该期大部分时间内沉积物 + 水的供应和潜在可容纳空间大致呈现平衡的状态。湖水的注入足够间断性地充满可容纳空间，但达到湖水外泄的情况较少，保持了封闭式湖泊水文特征，成为真正意义上的深水常年闭流湖。根据硼元素古盐度测定，沙三下亚段沉积时期湖水盐度平均为 12‰，较沙四上亚段沉积时期盐度大幅度降低，但仍保持了一定的古盐度，属于半咸水环境。该时期生物多样性得到了明显加强，在湖盆边缘地区或者湖水表层生长了大量的微咸水—淡水浮游藻类，如渤海藻、副渤海藻等。由于水体较深且存在一定的盐度，深湖区存在永久性分层，有利于有机质的保存和优质烃源岩的形成。该期深湖相背景下烃源岩岩石组合以纹层页岩、钙质纹层页岩和钙片页岩为主。

4. 断陷稳定期过补偿湖盆（沙三中亚段）

该期为盆地由断陷鼎盛期向稳定期转化时期，沉降速率减缓，气候湿润，湖水的注入量大大超过蒸发量，沉积物 + 水的供应长期超过潜在可容纳空间，湖平面超过泄水口，表