

油藏及开发 地球化学导论

侯读杰 张敏 赵红静 陈奇 著

石油工业出版社

油藏及开发地球化学导论

侯读杰 张敏 赵红静 陈奇 著

石油工业出版社

内 容 提 要

油藏及开发地球化学是传统的有机和无机地球化学与油藏工程、石油工程紧密结合的产物,采用现代地球化学分析测试技术,结合各项工程作业资料,直接研究油藏液体的非均质性形成机理和分布规律及其与油藏中矿物岩石的相互作用,探索油气充注、聚集历史与定位成藏机制。

本书可供石油地球化学、石油地质学科技工作者参考,也可作为大专院校相关专业师生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

油藏及开发地球化学导论/侯读杰等著
北京:石油工业出版社,2001.6
ISBN 7-5021-3245-7

- I. 油…
- II. 侯…
- III. 油气勘探:地球化学勘探-概论
- IV. P618.130.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2001)第12737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)
石油工业出版社印刷厂排版印刷
新华书店北京发行所发行

*

787×1092 毫米 16 开本 16.75 印张 426 千字 印 1—1200
2001 年 6 月北京第 1 版 2001 年 6 月北京第 1 次印刷
ISBN 7-5021-3245-7/TE·2460
定价:36.00 元

前 言

80年代后期,石油地球化学(Petroleum Geochemistry)研究领域逐步拓宽,并由单纯的烃源岩地球化学研究逐步向油藏和开发方面的研究进行转移,通过应用地学和化学知识,研究油藏评价、开发和采油生产等问题,并由此产生油藏及开发地球化学(Reservoir and Production Geochemistry)的新兴学科分支,在全球形成油藏及开发地球化学研究的热潮,油藏及开发地球化学因此应允而生。油藏及开发地球化学从一开始发展,就因为它紧密地结合石油开发和生产,解决开发过程中的实际问题而显示出它旺盛的生命力。油藏及开发地球化学脱胎于油气地球化学,发展于储层地质学,归属于石油地质学,是多种学科相互渗透交叉的综合产物。油藏及开发地球化学是传统的有机和无机地球化学与油藏工程、石油工程紧密结合的产物,采用现代地球化学分析测试技术,结合各项工程作业资料直接研究油藏流体(油、气、水)的非均质性形成机理和分布规律及其与油藏中岩石矿物的相互作用,探索油气充注、聚集历史与定位成藏机制。在理论上,它与含油气系统、油源灶和油气运移的研究接轨;在实践中,又将在油田勘探、油藏描述与评价、油田开发与采油工艺研究诸方面发挥日益重要的作用,成为理论性和实践性都很强的一门应用地球化学学科,构成本世纪末地球化学领域的一个新的学科生长点。最近,美国化学学会(American Chemical Society)召开的2000年会议有两个专题涉及到本研究领域:①有机地球化学和 pVT 研究结合起来应用于石油勘探和开发;②石油生产中的固体有机质。

由于油藏及开发地球化学必将给油气田的勘探与开发带来显著的效益,因此在短短的十年间,普遍受到国际石油财团的重视和支持,并且得到了迅速的发展。在我国,由于油藏及开发地球化学技术的引进较早,其研究与发展基本上与国际同步,特别是江汉石油学院,在通过与英国的合作中,在国内率先开展此领域的研究,并率先在国内引进了含氮化合物分析等油藏地球化学技术,并结合我们油田的实际情况,做了一些工作,为推动我国在这一领域的研究工作做出了努力。通过对外合作和邀请国外学者来中国讲学,在这个领域的研究有了长足的发展,同时还率先在国内开设了硕士研究生“油藏及开发地球化学”课程。但这些工作仅仅是初步的,距离石油工业对我们的要求仍有相当的差距。目前,国内外许多单位均开展油藏及开发地球化学探索性的研究工作,如石油大学(北京)、胜利油田、大庆油田、辽河油田、吐哈油田等单位在各个领域做了许多创造性的工作。江汉石油学院正积极地与全国各大院校和油田密切结合,力争和广大同仁一道,在油藏及开发地球化学研究领域从理论和实践上有所创新,为我国石油工业的发展做出新的、更大的贡献。

在实际的研究工作和教学中,一些现场工作的同志和学生提出希望能够得到有关这方面较为全面的资料;我们也希望能把近些年来引进消化的资料进行初步的总结,以利于该研究领域的进一步发展;同时研究生的教学也需要有一个初步的蓝本,这些因素促成了本书的出版。

在本书的编写成文过程中,得到了原中国石油天然气集团公司勘探局高瑞祺局长的鼓励和支持。胜利石油管理局张林晔总工程师、大庆石油管理局冯子辉总地质师、方伟高级工程师、李景坤高级工程师、霍秋立高级工程师等,石油大学(北京)钟宁宁教授、张枝焕副教

授、黄志龙副教授、李素梅博士，中国石油天然气集团公司油气地球化学重点实验室戴金星院士、黄第藩教授、梁狄刚主任、张大江主任、张水昌博士，中国石油勘探开发科学研究院廊坊分院地球化学实验室李健博士、胡国艺同志，吐哈石油会战指挥部勘探开发研究院实验室王义才高级工程师，塔里木石油勘探开发研究院弥继良高工、黄克难高级工程师、肖中尧高级工程师，辽河石油管理局勘探开发研究院萧乾华高级工程师、许坤高级工程师、李金友高级工程师等许多同志也给我们的工作以大力的支持，在此笔者表示衷心的感谢。最后，我还要感谢我的老师和同事梅博文教授、王培荣教授、林壬子教授、王铁冠教授，本书的编写，也是在他们的教育和启迪下完成的。同时，还有许多同事对我们的研究工作给予大力的帮助，如加拿大联邦地质调查局黎茂稳博士，中国科学院广州地球化学研究所彭平安研究员，中国科学院兰州地质研究所陈践发研究员和刘文汇研究员等，在此一并表示感谢。

本书各章节的分工如下：绪论、第一章、第三章、第九章、第十章由侯读杰编写；第八章由侯读杰和张敏编写；第四章、第七章由张敏编写；第五章和第六章由赵红静编写；第二章由陈奇、侯读杰编写；全书由侯读杰统编、定稿。由于油藏及开发地球化学的众多领域还远未成熟，许多研究正在探索和发展中，本书只能起到一个“抛砖引玉”的作用，因而本书定名为《油藏及开发地球化学导论》。限于笔者水平，书中错误之处难免，希望广大读者指正。

侯读杰

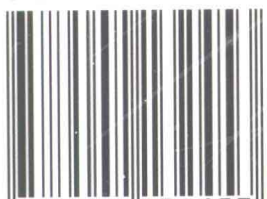
2000年8月1日

定稿于湖北荆州江汉石油学院

INTRODUCTION TO RESERVOIR AND PRODUCTION GEOCHEMISTRY

责任编辑：谭忠心 封面设计：赛维玉 责任校对：王 颜

ISBN 7-5021-3245-7



9 787502 132453 >

ISBN 7-5021-3245-7/TE · 2460

定价：36.00 元



目 录

| | |
|-----------------------|-------|
| 绪论 | (1) |
| 第一章 油藏地球化学研究的理论基础 | (8) |
| 第一节 石油的物理性质和化学组成 | (8) |
| 第二节 地层原油的高压物性 | (13) |
| 第三节 天然气的流体性质 | (15) |
| 第四节 流体体系和油气藏流体的分类 | (17) |
| 第五节 油气藏的驱动类型与油气采收率的关系 | (20) |
| 第六节 地层流体化学成分与天然气成藏的关系 | (23) |
| 第二章 油藏及开发地球化学的关键技术 | (34) |
| 第一节 关键技术 | (34) |
| 第二节 样品分析与数据处理 | (45) |
| 第三章 非烃地球化学 | (49) |
| 第一节 石油中的含氮化合物 | (49) |
| 第二节 含氧化合物 | (66) |
| 第四章 储层流体中的有机和无机相互作用 | (71) |
| 第一节 有机酸的分布和来源 | (71) |
| 第二节 有机酸与矿物颗粒之间的相互作用 | (78) |
| 第三节 次生孔隙的形成与预测 | (86) |
| 第四节 烃—水—岩相互作用 | (96) |
| 第五章 油藏地球化学描述 | (101) |
| 第一节 油藏描述概述 | (101) |
| 第二节 油藏地球化学描述的方法、原理与应用 | (104) |
| 第三节 油藏地球化学描述参数的选取及意义 | (107) |
| 第四节 单井油藏地球化学描述实例 | (110) |
| 第五节 连井油藏地球化学描述实例 | (114) |
| 第六节 U1a 油田油藏地球化学描述实例 | (118) |
| 第六章 油藏内部的连通性与分隔性 | (123) |
| 第一节 油藏注入和混合原理 | (123) |
| 第二节 油藏连通性的判别 | (130) |
| 第三节 油水界面的确定 | (141) |
| 第四节 有机隔层——焦油席的确定 | (145) |
| 第七章 油藏的形成机制研究 | (152) |
| 第一节 圈闭的注入作用和混合作用 | (152) |
| 第二节 油气运移的地球化学研究 | (158) |
| 第三节 油气藏的形成过程 | (177) |

| | |
|------------------------------------|-------|
| 第八章 油藏的地球化学动态监测 | (191) |
| 第一节 油藏的无机地球化学监测..... | (191) |
| 第二节 油藏烃类流体类型的划分与监测..... | (198) |
| 第三节 应用原油色谱指纹分布研究油藏产能分配..... | (209) |
| 第九章 油气混源及运移方向的地球化学识别 | (215) |
| 第一节 油气混源现象的地球化学识别及定量计算..... | (215) |
| 第二节 国内研究实例..... | (216) |
| 第三节 国外研究实例——英国 Beatrice 油田原油 | (225) |
| 第十章 开发地球化学的研究及发展展望 | (229) |
| 第一节 注水开发过程中地层原油性质的变化..... | (229) |
| 第二节 火烧油层对原油族组分的影响..... | (230) |
| 第三节 油藏中沥青质的吸附和在开采过程中的变化..... | (233) |
| 第四节 深部烃类相态的预测理论与方法..... | (239) |
| 参考文献 | (244) |

绪 论

一、油藏及开发地球化学的定义及研究范围

油藏及开发地球化学是应用传统的有机和无机地球化学与油藏工程、石油工程紧密结合起来,采用现代地球化学分析测试技术,并综合各种油田现场资料直接研究油藏流体的非均质性形成机制、分布规律及与油藏中有机与无机岩石矿物的作用,探索油气充注、聚集历史与定位成藏机制,从而将其应用于增强勘探,尤其是在采油和开发的策略措施的一门新的分支学科。它是一门实验性、应用性很强的应用地球化学学科分支,由于其和生产实际应用的密切联系受到广大学者和现场工作者的重视,从而构成地球化学领域的一个新的学科生长点。

油藏及开发地球化学的研究领域很广,可以说凡是应用地球化学手段及方法,研究油藏勘探和石油开发的一切问题均属于油藏及开发地球化学研究的范畴。1995年9月中旬在西班牙巴斯克召开的第16届有机地球化学会议上,油藏及开发地球化学成为石油地球化学领域的主要研究方向,征文主要范围可以涵盖目前油藏及开发地球化学的主要研究领域。包括如下几个方面:

- ①油水界面焦油(超重油)席的探测与解释(Detection and interpretation of tar mats);
- ②单井技术(Single well techniques);
- ③流体充注与油藏聚集史的确立与重建(Determination and reconstruction of filling histories);
- ④油藏空间分隔性与渗透屏障的评价(Assessment of reservoir compartmentalisation and permeability barriers);
- ⑤流体充注与混合时间规模的模拟(Modeling filling and mixing time scales);
- ⑥探测不同含油与含水区块的统计学方法(Statistical methods for detecting different petroleum or aqueous populations);
- ⑦采出流体的生产监测(Production monitoring of produced fluids);
- ⑧油藏演化中的生物降解作用、水洗、热演化和裂解作用(Biodegradation, water washing and secondary cracking in reservoir alteration);
- ⑨高温高压储层(High pressure high temperature reservoirs);
- ⑩油-水和油-矿物相互作用(Oil water and mineral interaction)。

Larter和Aplin(1995)总结了目前油藏及开发地球化学在油气田勘探开发中的主要应用领域,包括如下几个方面:

- ①根据试井原油特征测定烃源岩类型和成熟度;
- ②通过对油田充注点或运移路线的研究,来帮助确定新的卫星油田的位置和区域性运移路线;
- ③盆地古水文学或原油蚀变控制因素的评定;
- ④油气藏封闭性评定。在油藏评价和储层评价中的应用包括:流体界面的确定;油藏连通性确定;为投资和利用决策需要,评定油柱质量和历史; S_w (含水饱和度)的计算;

⑤焦油席 (tar mat) 确定;

⑥与脱沥青有关的潜在开采问题的鉴别;

⑦石油—水—岩石相互作用及其对介面润湿性和石油粘度的影响;

⑧在油田开发和生产监测中的应用:屏障(边界)定位与输入采油生产模式;为评价采油生产计划所进行的生产监测;管道漏失评定——混合的采油生产问题;注水突进的评定;油藏酸化机理。

上述几个方面的研究方向是近期油藏和开发地球化学研究的几个热点问题。目前油藏及开发地球化学已被成功地应用于解决有关油气藏形成机理、油藏评价和开发的问题。其中最有成效的应用领域是:根据油藏内流体的非均质性特征研究储层流体的连通性,探索油气充注、聚集历史与定位成藏机制、储层孔隙形成的有机—无机反应及孔隙分布预测;油藏及开发地球化学描述与油藏注入史研究;油田开发生态的地球化学监测;油—岩润湿性的地球化学机制及其应用。此外,目前地球化学方法在其他许多方面也得到了较好的应用效果,比如:混采油藏产层位置的确定,中途测试前原油物性的预测,生产层与非生产层的识别,油藏非烃和高分子量烃的表征和预测等。此外,油层中的包裹体残余盐类、原油中非烃成分的研究也可应用于解决油气运移、充注、聚集历史、成藏时间乃至油—水—岩相互作用及其对石油润湿性、粘滞性的影响等,进而向油藏工程学的渗透,为油田勘探开发提供新的依据。但笔者认为油藏和开发地球化学的领域并不仅仅限于此,相信随着今后研究工作的深入,其研究的领域会进一步拓宽。

二、油气勘探地球化学与油藏及开发地球化学的相似性与差异

长期以来,在石油工业中有机地球化学的主要目标是面向油气勘探而不断发展壮大起来,石油地球化学家的主要研究任务是鉴别与评价含油气盆地的主力烃源岩、进行油源对比、确定区域性的有机质成熟度和热演化史、计算生油量和盆地的资源量,为区域勘探决策提供依据。因而在70年代和80年代石油地球化学最为热门的话题是干酪根(Kerogen)学说和生物标志化合物(Biomarker)理论,而对油气藏形成规律与油气藏中流体特征虽有所涉及,如原油的运移和生物降解现象,但其它研究工作则相对较为薄弱,甚至是空白。

然而,随着石油勘探工作的不断深入,在进入区域勘探阶段和油田勘探(评价)阶段之后,特别是进入滚动勘探开发和油藏开发阶段,有机地球化学所发挥的作用,被认为是“似乎”非常有限的。80年代中期以来,由于全球范围内未经石油勘探开发的沉积盆地日趋缩小,海洋与荒漠地区勘探费用日益高昂,加之世界石油市场油价下跌,导致国际石油勘探市场渐趋萎缩。在全球面临油价较低,经济形势不佳的情况下,国际上许多油公司纷纷减员,地球化学家和地球化学研究不断受到冲击。在面临着研究对象不断发生变化及油公司对地球化学学科要求能够为石油勘探和开发提供有效和实用的技术的情况下,地球化学的研究重点在最近十年转向直接面向勘探、开发问题了,特别是已参与和渗透到油藏的开发生产与监测管理等研究领域中来。油藏和开发地球化学应运而生。促进油藏及开发地球化学发展的驱动力始终是由于很多公司朝着更为专事采油生产企业方向发展的结果。世界石油工业面临着在勘探成熟盆地如何增储上产,确保下一世纪能源需求的问题。一些石油公司把重点从区域性油气勘探,转向专事油田开发生产,同时又面对现有油田(特别是中、老年期油田)怎样提高采收率的问题。在这个背景下,油藏开发地球化学大有用武之地。首先是西北欧的有机和无机地球化学家携手从北海的勘探与开发中存在的问题入手,以结合油田勘探寻找卫星油藏,服务于油田开发和开采为宗旨,率先开展地球化学油藏描述,研究油藏注入聚集成藏历

史, 揭示油气混合成藏模式, 以至进行油藏开采过程中的生产监测, 改进采油工艺, 提高油藏最终采收率。从而奠定了发展油藏及开发地球化学新学科的基础。

石油地球化学的研究重点从原来的勘探地球化学逐步转向为油藏及开发地球化学。并带来了几个新的地球化学研究思路的变化: 首先是主要的研究对象从烃源岩转向以油藏为主体的烃源岩到储集岩的油藏体系; 其次, 从研究的学术领域来看已经不局限于有机地球化学问题, 而是广泛地涉及到许多无机地球化学、油藏工程等多个学科的问题, 并进一步促进了有机和无机地球化学的融合; 带来的第三个变化是采用一系列原有的地球化学分析技术和指标体系去解决新的油藏工程问题。例如, 开展油藏及开发地球化学描述, 判断一口探井或一个探区油藏(特别是多薄油层油藏)的连通性; 指示成藏过程中石油的充注点与运移方向, 从而部署新探井等方面, 均有取得良好效益的成功范例。因而从目前的研究来看, 勘探地球化学和油藏及开发地球化学在应用的地球化学手段和方法上并没有较大的差异, 不同点在于研究的对象和解决的问题发生了重大的变化。但相信今后在油藏和开发地球化学研究的方法和手段上会进一步得到发展。

三、国内外油藏及开发地球化学研究现状

80年代中期, 国内外石油行业中兴起了油藏描述(Reservoir Characterization)与“储层地球化学”研究热潮, 这两项研究的重心主要以强调储层物性空间变化规律为自己的研究目标。自1985年以来, 石油地球化学家的研究焦点也日益明显地从勘探转向采油和与油藏有关的问题。然而, 尽管当前油藏及开发地球化学研究已引起人们广泛的兴趣, 但是在1985年以前几乎没有多少文献报导。Larter(1994)对1951—1991石油工程学会(SPE)全部出版物的计算机检索结果表明, 有关油藏及开发地球化学公开发表的文献资料极为有限, 且大多数论文均出现在1985年之后。我们以国际有机地球化学会议为例, 统计油藏及开发地球化学论文数量的变化也同样可以反映出油藏及开发地球化学的发展历程(表1)。

表1 国际有机地球化学会议油藏及开发地球化学方面的论文数统计表

| 日期 | 会议名称 | 论文总数 | 油藏及开发地球化学论文数 |
|--------------|---------------|------|--------------|
| 1985.9.16~20 | 12届国际有机地球化学会议 | 170 | 1 |
| 1987.9.21~25 | 13届国际有机地球化学会议 | 222 | 2 |
| 1989.9.18~21 | 14届国际有机地球化学会议 | 375 | 22 |
| 1991.9.16~21 | 15届国际有机地球化学会议 | 277 | 25 |
| 1993.9.20~24 | 16届国际有机地球化学会议 | 306 | 30 |
| 1995 | 17届国际有机地球化学会议 | | 34 |

1. 国外油藏及开发地球化学的发展沿革

虽然油藏及开发地球化学只有十多年的发展历史, 但近年来已经取得了令人瞩目的进展。1984年Durand在一篇运移研究的综述性文章中提出了“油气藏有机地球化学”(Organic Geochemistry in Reservoir on Migration)。Dahl和Speer(1986)最早注意并检测到北海Odsberg油田石蜡基原油油藏的古、今油水界面处的焦油席, 并探讨了其形成机理及其对注水采油的影响。

England等(1987)通过Fortiers油田的地球化学研究, 首次将人们早已认识到的油藏

流体非均质性现象与成藏研究结合起来，首次提出了油藏充注与原油混合模式，并阐明了油藏及开发地球化学的概念，从而奠定了油藏及开发地球化学的理论基础。Leythaeuser 和 Ruckheim (1989) 最先报导了利用油藏石油组成的非均质性来探讨油气的聚集史。England (1990) 在有机地球化学 (Organic Geochemistry) 杂志中发表论文，正式地提出了油藏及开发地球化学的概念，并将有机地球化学、储层地质学和油藏工程有机地结合起来研究油藏，建立了油藏有机地球化学的基本理论。利用原油的气油比确定 Forties 油藏周缘可能的油气充注方向，并进一步论述了石油注入油藏后的混合作用机理。这篇论文的题目及关键词均使用了“油藏有机地球化学”(Organic Geochemistry of Petroleum Reservoir) 这一术语。

在上述油藏及开发地球化学的探索性研究进展的基础上，一个主要由英国纽卡斯尔大学和挪威奥斯陆大学的地球化学家和沉积学家等参与的国际合作研究项目，将油藏流体地球化学描述与成岩作用研究相结合，成功地剖析了北海 Ula 油田的油藏聚集史，将油藏及开发地球化学研究提高到一个新的水平 (Larter 等, 1991)。Larter 等 (1991) 成功地研究了北海乌拉油田的油藏聚集史。Horstad 等 (1989) 对北海油田研究确定五种主要的油藏充注成藏体系，并用于两口探井检验，其中之一已成功测试出烃类。1992 年欧洲共同体为了欧洲特别是北海石油工业的长期发展，批准执行一项旨在发展油藏及开发地球化学前沿理论和技术的科学计划，由西欧的大学和科学家合作进行实施。其中石油的二次运移机理研究，储层非烃的分析化学与地球化学、流体—岩石相互作用等为其重要内容，为建立石油的二次运移理论模型，它们选择了西加拿大盆地为例，进行重点解剖，采用地质示踪剂技术研究石油运移的分馏效应，力求定量研究石油二次运移的方向、路径和体积，并进而建立预测模型，以指导外围盆地的勘探。这一导向性的研究计划大大促进了欧洲油藏有机地球化学的发展，并使西欧成为油藏及开发地球化学研究的重要地区。

与此同时，在油藏及开发地球化学描述技术 (方法) 方面也取得很大进展，由于油藏及开发地球化学直接研究流体分布，实际上推动了油藏描述表征技术的发展。如 Karlson 和 Larter (1989) 研究油藏内部石油组成类型的快速对比方法，将原来用作医用扫描的薄层色谱—火焰离子检测技术，应用于研究的快速扫描分析，结合其他分析技术，并应用于油藏描述。

Karlsen 和 Larter (1989), Bjørroy (1985, 1992, 1993) 把热蒸发 (即热脱附) —气相色谱—火焰离子检测 (FID) 或质谱 (MS) 技术引进地球化学研究领域，为油藏及开发地球化学研究所需要的大量样品的扫描分析创造了条件。Kaufman 等 (1990) 利用原油中大量化合物的“气相色谱指纹”研究多薄层油藏中的连通性。Saigal 等 (1992) 将北海埃尔德非斯克油田岩心分析结果，结合重复地层测试 RFT 试井压力测试数据，研究油藏内部流体地球化学不连续性，判断油藏边界获得成功。

H. I. Halpern (1995) 介绍了一项应用轻烃星状图解进行油藏及开发地球化学研究的新方法。此外，Kharaka 等 (1988) 还将油藏中水—岩相互作用的理论模式和计算机模型应用于盆地的储层预测和采油过程的动态评价。

Smalley 等 (1992, 1995) 应用地层水中残余盐同位素分析进行油藏及开发地球化学描述。Philp 等 (1995) 发展了原油中 C_{40}^+ 高分子量烃类检测技术，认为这些烃类易造成地下油层和地面管线的堵塞。这些研究成果表明，油藏及开发地球化学描述技术和成果向油田开发与开采领域的延伸。

Horstad 等 (1990) 使用原油中生物标志物成熟度参数在油藏平面上的变化规律判断

Gulfaks 油田的油气充注方向。Saigal 等 (1992) 将北海 Eldfisk 油田岩心分析结果, 结合重复地层测试资料研究油藏内部流体地球化学不连续性, 判断油藏边界获得成功。England 和 Mackenzie (1989), England 和 Mackenzie (1995) 用 GOR 值变化确定了 Fortier 油田的大致充注方向; Hillebrand 和 Leytheuser (1992) 应用原油组成非均质性研究了北海 Stockstadt 油田的多源供油和石油充注方向。

Wilhelms 和 Larter (1994) 通过研究发现焦油席的出现将有损于油藏质量, 在油田开采过程中可能发生脱沥青作用并在低渗透路处堵塞油层, 造成“死油”储量。

这些技术或方法都大大地促进了油藏及开发地球化学的发展。1993 年 1 月欧美油藏及开发地球化学专家在伦敦召开了首次油藏及开发地球化学的研讨会, 会后由 Cubitt 和 England 将会议交流论文编辑《油藏及开发地球化学》出版, 这是国际上这一领域的第一本论文集, 书中分“全面综述与新技术”和“实例研究”两个部分, 系统而详细地介绍了油藏及开发地球化学的涵义、方法、应用和机遇。石油大学(北京)的王铁冠教授等已将本书翻译出版。

2. 国内油藏及开发地球化学的发展沿革

从 1989 年以来, 国内翻译出版的油藏及开发地球化学方面的论文集主要有三本。①梅博文教授主编的《储层地球化学译文集》, 它反映了油藏及开发地球化学发展的初始阶段国外学者的研究成果, 中心议题是储集岩成岩过程的有机—无机反应及其石油地质意义。②林壬子教授主持编译的《油藏地球化学进展》, 基本上收集了国外 1993 年以前的油藏及开发地球化学研究论文, 代表了国际上油藏及开发地球化学的发展和研究现状。③王铁冠教授翻译的《油藏及开发地球化学》(参见上文)。

总体上来讲, 我国石油地球化学界开展有关油藏及开发地球化学的研究比较早, 早在“七五”中期, 梅博文、应凤祥、陈丽华等最先开展油田水有机酸分析, 研究“生油层—储层的有机—无机相互作用”对储层物性的影响。

1992 年洪志华等采用热解分析、荧光光谱、族组成、碳同位素、元素、红外光谱、气相色谱等常规地球化学分析技术, 对塔里木盆地东河 11 井石炭系储层原油进行地球化学研究, 在识别油层与认识其含油性方面取得进展。

1993 年王培荣主要采用 Rock - eval 岩石热解和薄层色谱—火焰离子检测技术, 对塔里木塔中 4 号构造的 3 口井石炭系油藏进行有机地球化学描述的初步尝试, 研究了三个油藏的油源与主要充注方向, 检测出 3 个“沥青质或稠油富集层”, 标志 3 个不同深度的古、今油水界面, 从而对油藏演化与保存史有所认识。

1994—1995 年王庭栋和廖永胜等引进全烃地球化学分析技术, 进行储层烃地球化学研究, 重点进行油源和油气运聚带的研究, 也有所成效。

1995 年, 张敏、梅博文等对塔里木盆地牙哈 2—3 构造作了油藏及开发地球化学描述, 并讨论了库车油气系统油气藏聚集史。1997 年张敏将该研究成果整理, 以专著出版, 专著的名称为《油藏地球化学——塔里木盆地库车含油气系统研究》。

1996 年廖永胜、王庭栋等以渤海湾盆地埕岛油田、曲堤地垒和四川盆地磨溪气田为例开展了“油藏及开发地球化学”专题研究。上述工作都是十分有益的尝试, 对国内油藏及开发地球化学描述和油藏及开发地球化学学科的发展起了促进作用。但是, 全面系统地开展以油藏描述和油藏聚集史等领域的油藏及开发地球化学研究, 如何更好地应用于石油的勘探、开发实践工作中, 取得实效, 还有待于今后广大地球化学家的共同努力。

四、油藏及开发地球化学与其他相关学科的关系

油藏及开发地球化学是一个新的交叉性的研究领域，和传统的无机地球化学、石油地质学、油藏工程、石油化学等学科均具有密切的联系。以下将简要讨论油藏及开发地球化学与其他一些学科的关系。

1. 无机地球化学

无机地球化学的研究重点则是与沉积学相结合，其焦点则总是瞄准油层质量，并且大部分无机地球化学研究只涉及岩石基质，这在描述和定量评价岩石性质方面发挥着重要的作用。但它忽略了油藏流体中包含的地质学和地球化学信息，从而忽略了对油气藏中流体的研究，这也就不可避免地限制了无机地球化学在油气田勘探、开发中的作用。随着国际石油工业向纵深发展，将无机地球化学和油藏地球化学结合起来，应用水化学分析研究油藏检测；应用流体包裹体技术和矿物相变研究油藏问题。使得无机地球化学和油藏地球化学的结合日益密切，并不断受到广大学者的重视。

2. 石油地质学

石油地质学是油藏地球化学研究的重要基础。油藏聚集史研究是石油地球化学面向解决石油地质问题的一个典型案例，同时也是该学科面向解决开发生产等实际问题的一个立足点和中心环节。通过对盆地（凹陷）油气的生排运聚过程定位到圈闭中油气的充注聚集和油气水的定位历史的研究上，有点有面，点面结合，深入理解和剖析油气的生成过程和油藏的形成模式，更好地为油气田勘探开发生产服务。

3. 沉积储层

沉积储层作为油藏流体的容器和通道，其质量的好坏直接影响着油藏的开发。毫无疑问，对油藏地球化学的研究必然需要了解储层的性能和空间展布。在油藏地球化学研究中，涉及到沉积储层的研究领域较多，如储层的有机-无机相互作用及其对储层的影响。沥青质的沉淀形成固体物质也许会充填进孔隙中而限制了油藏中的孔隙喉道，进而改变盆地评价中油藏质量评估的预测结果。蜡质和沥青一样可沉积在生产管道中从而导致远到储运罐的封存。

4. 石油工程

导致低效开采的作用包括：油藏异化、焦油席、沥青、蜡沥青等油源屏障的形成，油与矿物基质的相互作用，蜡质原油的低粘度以及原油生物降解作用等。对油藏中石油流体定位作用的理解，有机/无机相互作用性质的理解，以及对在初次、二次、三次采油过程中石油成分随时间变化的认识，将会导致对目前所采用的开采残余油的方法进行改进。另外，对油藏及开发地球化学问题的更好理解也将有助于更有效的油藏管理。其中，一个重要方面就是认识油藏内部连续性以帮助确定其他生产井的井位。油藏内部连续性及混合作用的确定，以及来自不同烃源岩的原油的定位，可通过全油气相色谱技术方便地进行研究。一个连续的油藏其原油具有相似的色谱指纹，而来自分隔油藏或单一油藏中不同分隔单元的原油，即使来自同一烃源岩，它们也有不同的指纹，尽管这种差别可能很微小。

5. 石油化学

此外，在预测何种类型原油可能与含蜡问题有关及蜡质沉积开始时间的确定上，地球化学也发挥了重要作用。蜡质沉积通常是由聚集和生产期间石油流体的超临界特征变化而引起的。深部油藏的温度也许会超过甲烷、乙烷等低分子石油组分的临界温度，而这些低分子化合物可作为高分子烃类的超临界溶剂。油藏压力在生产期间的降低将导致该超临界溶解体系

携带能力的降低与蜡质沉积。所形成的蜡典型地包含相对较高浓度的 C_{30} 以上甚至高达 C_{100} 的高分子烃类，但它们在由井头所采原油中并不见得能观测到。现在高温气相色谱柱与超临界流体色谱技术，就可对高达 C_{120} 的高分子烃类进行观测与描述。

沥青被典型地定义为“加入过量轻烃条件下沉积于原油以外的物质”。油藏内沥青的沉积导致了焦油席的形成。棒色谱扫描技术作为快速圈定油藏的方法业已在北海地区得到广泛应用，从侧向和横向上表明几个较薄焦油席的存在，假若它们未被检测出来，以后就会导致与生产有关的严重问题。

五、油藏及开发地球化学课程的学习方法

由于油藏及开发地球化学是一个新的发展领域，其研究成果远未成熟和系统化，因而对油藏及开发地球化学导论课程的学习，一要动态地学，把书本的学习和文献阅读结合起来。通过阅读最新的文献，随时掌握学科的最新发展。二是要辩证地学习，因为许多研究方法和成果尚待进一步完善，甚至有些研究是错误的。三是要活学活用。学习并不是以学习这些基本知识为主，而以学习研究方法，从各个相关的学科中接受新的思路和营养，“它山之石，可以攻玉”，并在学习的过程中创造性地吸收和思考。一切以解决油藏和开发过程中的实际问题为目的。

笔者认为，邓小平同志关于改革的两大理论：“摸着石头过河”的石头论及“不管黑猫白猫，逮住老鼠就是好猫”的猫论，对于我们油藏和开发地球化学的发展同样有一定的指导意义。油藏和开发地球化学是一项新的研究领域，需要我们“大胆创新，严密求证”。目前，石油开发在过去几十年中有了长足的进展，但是在多数油藏即使经过二次、三次采油技术的应用，通常仍有三分之二的原油保存在原地，因此，开发地球化学如何发展有效实用的技术就显得极为重要。我们不能以学科界定我们的研究领域，而应以解决问题为最根本的出发点，只要能将我们的地学和化学知识结合起来，能够解决勘探和开发中的实际问题，都是好的有效和实用的技术。因而本书只能作为油藏和开发地球化学的导论，希望能够“抛砖引玉”，满足广大地球化学工作者系统地接受这一新的学科生长点的要求，并能够为研究生的学习提供一个学习的初步蓝本。

第一章 油藏地球化学研究的理论基础

第一节 石油的物理性质和化学组成

一、石油的物理性质

石油的物理性质是人们最易观察的，如原油的密度、粘度和颜色等。这些少数易于观察和测量的物理性质，对于地质学家以及所有使用石油的人们的分析研究工作是很有意义的，当然，原油的物理性质主要是由它的化学成分而决定的。不同地质时期和盆地类型的原油，其组成变化很大，不同产地的原油都有其自身的特点，在原油中目前已找到数以千计的烃类化合物，这些化合物的含量变化决定了原油的物理性质。

1. 颜色和折光率

原油颜色主要与原油内胶质和沥青质含量有关，胶质、沥青质含量高则原油颜色变深。所以原油的颜色深浅大致可以反映原油中重组分含量的多少。

目前我国发现的原油的颜色主要为棕黑色，部分凝析油呈透明状的橙色、棕黄色、黄色、浅黄色，有些甚至接近无色，这主要是饱和烃含量高，非烃和沥青质组分含量低所致。一般来讲，烷烃质石油通常均为浅色，透射光下呈黄至褐色，反射光下呈汽车引擎油样的熟悉的绿色。沥青基原油通常为褐色到黑色。

石油的折光率随相对密度而变化，大多数油样介于 1.42 至 1.48 之间。较轻的油折光率低，在低温条件下折光率也低。在任何一个分子量范围内，折光率从烷烃经环烷烃至芳香烃，依次增大。

2. 密度

石油的密度一般是指相对密度，即在 20℃ 单位体积石油的密度与 4℃ 相同体积水的密度之比。一般石油的相对密度介于 0.75 或略大于 1 之间。通常，重质石油是指相对密度为 0.92~1 (API = 22.3°~10°)，中质石油的相对密度为 0.87~0.92 (API = 31.1°~22.3°)，轻质石油的相对密度小于 0.87 (API 大于 31.1°)。石油的密度与颜色有一定的关系，一般淡色的石油密度小，深色的石油密度大。石油的密度与其化学组成，特别是胶质及沥青质含量以及石油的分子量和溶解气的数量相关。烷基石油普遍较轻，沥青基石油几乎总是重质的(密度通常用希腊字母 ρ 来标记)。现在在欧美国家比较通用的密度单位是 API。

API 与密度的关系为：

$$API = 141.5 / \rho - 131.5$$

图 1—1 为 API 与密度的关系图。从图中可以看出，不同密度的原油，取决于不同的化学组成。石油中典型化合物的密度及 API 参见图中所示。所以，在标准条件下，水的 API 度为 10°。

据概略换算，API 高于 31° 的石油可以被认为是轻质的；31°~22° 属于中等的，低于 22° 者即重质油。但这种标准也仅仅是一种大致的分类。在重质原油丰富的生产国，如委内瑞拉，API 为 20° 的油却被认为是中等密度的。世界范围的平均值是 API 为 33.3°。等级最好的原油约为 37° (API)，相当于相对密度 0.84。接近这种密度的原油在中东、美国，我国大

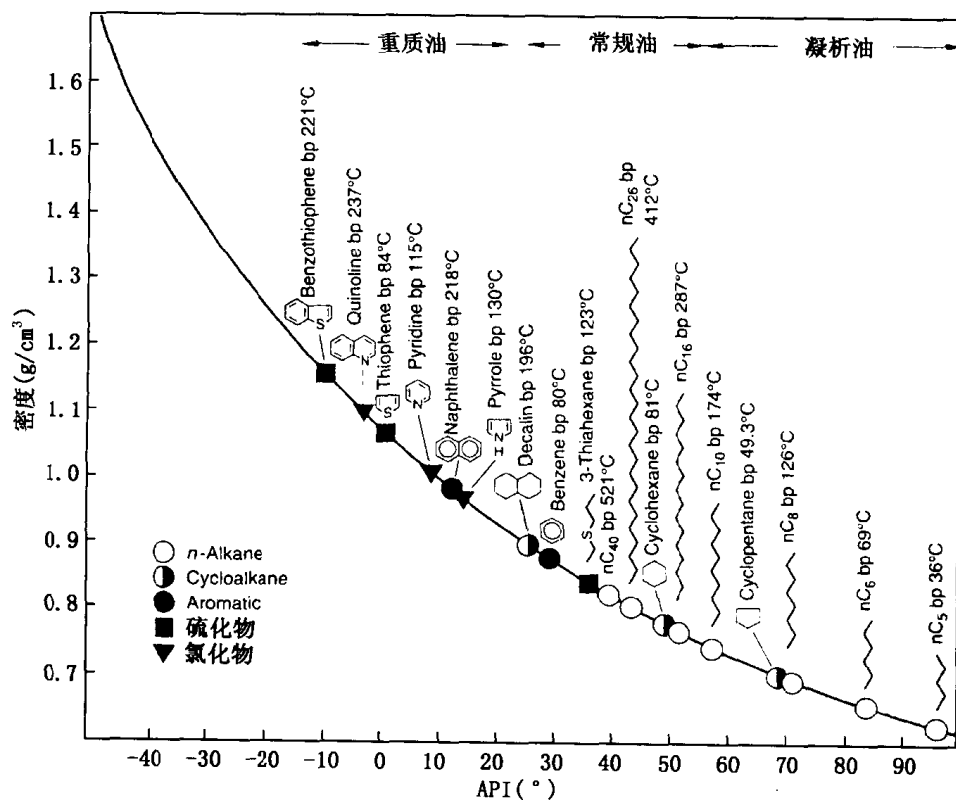


图 1—1 石油中典型化合物的 API 和密度分布图 (引自 Orr, 1988)

部分地区和阿巴拉契亚、阿尔伯达、利比亚以及欧洲北海都是很普遍的。表 1—1 列出了常见石油产品的密度和粘度。以我国松辽盆地为例，原油的相对密度主要在 0.84~0.88 (表 1—2)。我国其他典型地区原油的物理性质见表 1—3。

表 1—1 常见石油产品和水的性质

| 产 品 | 密度 (g/cm ³) | API (°) | 粘度 (mPa·s) |
|-----|-------------------------|---------|------------------|
| 汽油 | 0.74 | 60 | 6 |
| 煤油 | 0.78 | 50 | 20 |
| 柴油 | 0.79 | 45 | 100 |
| 润滑油 | 0.85 | 30 | 500 |
| 残渣 | 1 | 10 | >10 ⁵ |
| 水 | 1 | 10 | 10 |

表 1—2 松辽盆地北部各油层原油的物理性质综合表 (引自黄福堂, 1997)

| 油 层 | 相对密度 | 粘度 (mPa·s) | 凝固点 (°C) | 分子量 | 闪点 (°C) | 蜡熔点 (°C) | 含蜡 (%) | 含胶 (%) | 含硫 (%) | 残碳 (%) | 灰分 (%) |
|-----|--------|------------|----------|--------|---------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 黑帝庙 | 0.8592 | 33.0 | 36.4 | 421.46 | 82.1 | 52.0 | 26.0 | 15.2 | 0.172 | 2.69 | 0.17 |
| 萨尔图 | 0.8939 | 113.4 | 24.6 | 507.16 | 125.3 | 44.3 | 24.7 | 20.0 | 0.144 | 3.93 | 0.27 |
| 葡萄花 | 0.8599 | 40.0 | 33.5 | 402.17 | 80.9 | 51.6 | 25.7 | 14.2 | 0.125 | 3.00 | 0.18 |
| 高台子 | 0.8618 | 72.1 | 29.4 | 393.87 | 97.0 | 51.4 | 24.9 | 13.1 | 0.093 | 2.92 | 0.33 |