



高等院校石油天然气类规划教材

油气成藏地质学

赵靖舟 ◎ 主编

贾承造 ◎ 主审



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

高等院校石油天然气类规划教材

油气成藏地质学

赵靖舟 主编

贾承造 主审

石油工业出版社

内 容 提 要

本书介绍了油气成藏地质学的内涵、研究内容、研究方法、产生及发展过程,系统阐述了油气成藏地球化学、油气成藏年代学、油气成藏动力学、油气聚集成藏理论、大油气田形成理论等油气成藏学理论的原理和应用,并全面介绍了非常规油气藏的形成与分布。

本书可供相关院校作为油气地质勘探类专业本科生和研究生教材,同时也可作为从事油气成藏地质学研究与油气勘探工作者的重要参考书。

图书在版编目(CIP)数据

油气成藏地质学/赵靖舟主编.

北京:石油工业出版社,2013.12

(高等院校石油天然气类规划教材)

ISBN 978-7-5021-9937-1

I. 油…

II. 赵…

III. 石油天然气地质—高等学校—教材

IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 306161 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:<http://pip.cnpc.com.cn>

编辑部:(010)64523579 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

排 版:北京乘设伟业科技有限公司

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2013 年 12 月第 1 版 2013 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:17.75

字数:456 千字

定价:36.00 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

《油气成藏地质学》编写人员

主 编：赵靖舟

副主编：武富礼

编写人员及单位(按姓名拼音排序)：

曹 青 西安石油大学

李 军 西安石油大学

李艳霞 西安石油大学

时保宏 西安石油大学

王乃军 西安石油大学

王顺玉 西南石油大学

王晓梅 西安石油大学

武富礼 西安石油大学

肖 晖 西安石油大学

张凤奇 西安石油大学

张金川 中国地质大学(北京)

赵靖舟 西安石油大学

赵卫卫 西安石油大学

前 言

油气成藏地质学是研究油气藏形成和分布规律的一门科学,是石油地质学的核心。

20 世纪 90 年代以来,随着全球性油气勘探难度的进一步加大,油气成藏研究日益引起石油地质界和勘探界的重视,出现了含油气系统理论、流体封存理论、幕式成藏理论、成藏年代学、成藏地球化学、成藏动力学等一些新的油气成藏理论以及前缘性的成藏研究领域。特别是由于我国含油气盆地油气藏的形成和分布异常复杂,因而成藏研究在我国尤为活跃,成为 20 世纪 90 年代以来石油地质学中发展最快、进展也最大的一个领域。在此情况下,油气成藏地质学应运而生。

鉴于油气成藏地质学是石油地质学的核心学科,其研究对于当今以及今后难度越来越大的油气勘探具有十分重要的意义,进入 21 世纪以来,许多高等院校和科研院所都在相关专业的教学中开设了油气成藏方面的课程或在相关课程中加大了油气成藏方面的教学比重。2007 年,西安石油大学率先为本科生开设了专门的“油气成藏地质学”课程,2008 年又为研究生开设了“油气成藏地质学”课程。

然而,尽管油气成藏地质学是石油地质与勘探研究的核心内容,对学生的学习和毕业后从事石油地质与勘探方面的工作十分重要,但在国内外的教学中均未见有正式出版的教材。鉴于此,2007 年,石油工业出版社组织有关高校的专家讨论研究,决定将“油气成藏地质学”列入高等院校石油天然气类规划教材,并确定由西安石油大学作为主编单位,中国地质大学(北京)和西南石油大学为参加编写单位,共同进行教材的编写。本书就是由上述 3 所高校教师联合编写而成的,是国内外第一部专门介绍油气成藏地质学的教材。

全书共分 7 章。其中,第一章绪论由赵靖舟编写,第二章油气成藏地球化学由王顺玉编写,第三章油气成藏年代学由李艳霞、赵靖舟和肖晖编写,第四章油气成藏动力学由王晓梅、赵靖舟和张凤奇编写,第五章油气聚集成藏理论由时保宏、赵靖舟、武富礼、曹青和李军编写,第六章大油气田形成理论由赵靖舟、赵卫卫、王乃军编写,第七章非常规油气藏形成与分布由张金川和赵靖舟编写。全书由赵靖舟统稿。

由于编者水平有限,书中不足之处敬请各位专家学者、高校师生及广大读者批评指正,以便再版时改进。

编者

2013 年 10 月

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 油气成藏地质学的产生及其内涵和研究目的	(1)
第二节 油气成藏地质学的研究内容和方法	(3)
参考文献	(5)
第二章 油气成藏地球化学	(8)
第一节 油气成藏地球化学研究内容和方法及应用	(8)
第二节 油气成藏地球化学	(19)
第三节 油气运移地球化学	(34)
参考文献	(43)
第三章 油气成藏年代学	(46)
第一节 油气成藏年代学的研究目的和意义	(46)
第二节 油气成藏年代学研究方法	(46)
第三节 油气成藏年代学存在问题与发展趋势	(79)
参考文献	(81)
第四章 油气成藏动力学	(84)
第一节 油气成藏动力学的内涵与研究内容	(84)
第二节 油气成藏的主要作用力	(88)
第三节 油气成藏动力过程	(102)
第四节 油气输导体系	(115)
第五节 油气成藏动力系统	(121)
参考文献	(133)
第五章 油气聚集成藏理论	(136)
第一节 含油气系统理论	(136)
第二节 油气差异聚集理论	(145)
第三节 流体封存箱成藏理论	(150)
第四节 幕式成藏理论	(157)
第五节 油气补偿成藏理论	(168)
参考文献	(173)
第六章 大油气田形成理论	(175)
第一节 大油气田的概念及其基本地质特征	(175)
第二节 大油气田形成条件与分布规律	(183)
第三节 大油气田形成主要理论	(195)
参考文献	(221)

第七章 非常规油气藏形成与分布..... (223)

第一节 非常规油气的概念、类型及其资源潜力 (223)

第二节 非常规油气的主要类型..... (228)

第三节 油气成藏机理递变序列..... (269)

参考文献..... (277)

第一章 绪 论

第一节 油气成藏地质学的产生及其内涵和研究目的

一、石油地质学的发展与油气成藏地质学的产生

(一)石油地质学的发展

尽管商业性的石油生产已有 150 多年的历史,但石油地质学作为一门学科直到 20 世纪才得以确立。在 1900 年以前,还没有石油地质学这样的学科,那时所有的产油区都是通过油苗发现的。1861 年美国人 T. S. 亨特(Thomas Sterry Hunt)正式提出了背斜学说。但直到 1901 年在得克萨斯湾岸地区发现了斯平德托普油田后,背斜学说才在石油勘探中产生了实际的影响。这也是地质学对找油勘探所做出的第一次真正的贡献(诺斯,1985)。此后,石油地质学得以产生并发展,特别是 1917 年美国石油地质学家协会(AAPG)的成立,大大加快了石油地质学作为一门学科的发展。

总的来看,自 20 世纪初产生以来,石油地质学大体经历了 3 个发展阶段:20 世纪初—50 年代的油气圈闭理论发展阶段,20 世纪 60—80 年代的生油理论和初次运移理论发展阶段,20 世纪初 90 年代以来的油气成藏理论发展阶段(柳广弟,2007)。

进入 21 世纪以来,世界油气勘探的难度进一步加大。就全球而言,油气勘探已逐渐走向深水、深层、非常规、北极等新区以及新领域(贾承造,2012)。特别是近年来,美国非常规油气尤其是页岩气取得的巨大成功,使得在全球范围内兴起了非常规油气地质研究与勘探的热潮(赵政璋等,2005;翟光明等,2012),预计常规油气资源勘探和非常规资源勘探并存的局面即将形成(赵政璋等,2005)。在我国,油气勘探研究的难度同样不断加大,油气勘探的重心和突破发生了 7 大转变:一是圈闭类型由以往的寻找构造油气藏为主转为岩性—地层油气藏为主;二是勘探的盆地类型由东部断陷盆地和坳陷盆地转为中西部前陆盆地和叠合盆地;三是勘探对象的沉积相类型由陆相为主转为陆相和海相并重;四是勘探的深度由中浅层转至深层和超深层;五是勘探的海域由浅水转至深水;六是勘探的对象由以常规油气藏为主转为常规与非常规油气藏并重;七是勘探的成果由以油为主逐渐转为以气为主。据预测,中国未来 10 年油气勘探与开发的重点将是海相、深层、深水、非常规油气等领域(翟光明等,2012)。特别是非常规油气在我国资源丰富,勘探潜力很大(翟光明,2008;胡文瑞等,2010;邹才能等,2010,2011;邱中建,邓松涛,2012a;贾承造等,2012;赵靖舟,2012;马永生等,2012)。就我国油气勘探所取得的成果来看,20 世纪 90 年代特别是进入 21 世纪以来,我国天然气工业发展速度显著加快,尤其是煤成气理论的发展,极大地推动了我国天然气的勘探开发步伐,促进了天然气储量和产量的持续快速增长,并使得我国由产气贫国已发展为世界产气大国(戴金星,2009;戴金星等,2012)。预计未来我国天然气的产量将超过石油,使得能源消费结构得到显著改善(邱中建,邓松涛,2012b)。

油气勘探重心的转移必然导致石油天然气地质学研究重心的转移。因此,自 20 世纪 90

年代特别是进入 21 世纪以来,我国石油天然气地质学科得到了快速发展:一方面,传统的油气地质学研究不断深化;另一方面,研究领域不断拓宽,特别是非常规油气地质研究日益引起重视,并开始取得重要成果。鉴于此,有专家提出了建立新一代石油地质理论的构想(贾承造, 2005)。毫无疑问,新一代石油地质理论的核心仍将是油气成藏地质学理论。

(二)油气成藏地质学的产生

20 世纪 90 年代以来,随着全球性油气勘探难度的进一步加大,油气成藏研究日益引起石油地质界和勘探界的重视,出现了含油气系统理论(Magoon, 1988; Magoon, Dow, 1994; Demaison, Huizing, 1991; 赵文智, 何登发, 1996; 赵文智等, 2001)、流体封存箱理论(Hunt, 1990)、幕式成藏理论(Hooper, 1990; 龚再升, 1999; 郝芳等, 2003; 赵靖舟, 2003, 2005)、油气成藏年代学理论(辛仁臣, 2000; 赵靖舟, 2002; 赵靖舟, 李启明, 2003)、油气成藏地球化学(England, 1990; Leythaeuser, Ruckheim, 1989; Larter, Alpin, 1995; 丘比特, 英格兰, 1995; 林壬子, 张敏, 1996; 王铁冠, 张枝焕, 1997)、油气成藏动力学(田世澄等, 1996, 2001; 康永尚等, 1997; 康永尚, 张一伟, 1999; 郝芳等, 2000; 赵靖舟等, 2002; 赵靖舟, 2003)等一些新的油气成藏理论和前缘性的研究领域。特别是由于我国含油气盆地油气藏形成和分布格外复杂,因而油气成藏地质学研究在我国尤为活跃,成为 20 世纪 90 年代以来石油地质学中发展最快、进展也最大的一个领域。

鉴于油气成藏研究在当今油气勘探中越来越重要,已成为石油地质学中一个十分重要的领域,2002 年贾承造院士率先提出了建立油气成藏学的倡导,旨在进一步推动油气成藏方面的研究,使之更加有效地为油气勘探服务。此后,赵靖舟(2007)提出了“油气成藏地质学”的概念,并将其作为石油地质学中一门独立的分支学科看待。

可见,油气成藏地质学的提出,是石油地质科学发展的必然结果,也是 21 世纪油气勘探发展对石油地质学的必然要求。

二、油气成藏地质学的内涵及其在石油地质学中的地位

油气成藏地质学是研究油气藏形成和分布规律的一门学科,是石油地质学的核心。

在广义的石油地质学中,油气成藏地质学与石油构造地质学、有机地球化学、储层地质学、油气田开发地质学等学科相并列(图 1-1),它与石油地质学其他诸学科在研究内容和方法体系上均存在明显不同。其中,石油构造地质学、有机地球化学、储层地质学是油气成藏地质学研究的基础,三者是石油地质学中的基础性学科;而油气成藏地质学则是石油构造地质学、有机地球化学、储层地质学研究的延伸,是石油地质学研究的关键性学科。

与狭义的(即通常意义上的)石油地质学相比,油气成藏地质学具有自己鲜明的特色。尽管油气成藏问题是石油地质学研究的核心问题,但一般石油地质学教科书的重点是生、储、盖、运、圈、保等基本

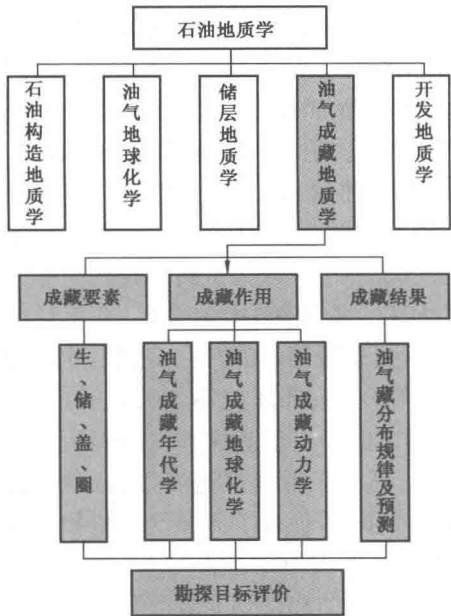


图 1-1 油气成藏地质学与石油地质学其他学科或领域的关系

成藏要素的介绍,另外,油气的基本性质以及油气藏的类型也是石油地质学教科书的基本内容;而油气成藏地质学则更多介绍和讨论的是油气成藏研究的深层次问题和各种理论问题,它是石油地质学的深化和提高。

三、油气成藏地质学的研究目的和意义

油气成藏地质学研究的主要目的是搞清已知油气藏的形成机理和分布规律,预测未知油气藏的分布,为勘探目标评价和勘探部署提供依据。

作为一门学科,油气成藏地质学研究的意义在于,一方面有助于推动复杂探区油气成藏研究的深化和勘探成功率的进一步提高,另一方面也有助于油气成藏地质学高级专业技术人才和理论创新人才的培养。因此,作为一门学科,油气成藏地质学的提出对于 21 世纪油气地质科学的发展和油气勘探事业的发展具有十分重要的意义。

第二节 油气成藏地质学的研究内容和方法

一、油气成藏地质学的研究内容与重点

(一)研究内容

油气成藏地质学的研究内容包括静态的成藏要素、动态的成藏过程和最终的成藏结果,涉及生、运、聚、保等影响油气藏形成和分布的各个方面,但重点是运、聚、保,其主要研究内容有以下 5 个方面:

(1)油气成藏要素研究:包括生、储、盖、圈等基本成藏要素的研究和评价,重点是各成藏要素耦合关系或配置关系的研究,目的为区域评价提供依据。

(2)油气成藏年代学研究:采用定性定量研究相结合的现代油气成藏年代学实验分析技术与地质综合分析方法,确定油气藏形成的地质时间,恢复油气藏的形成演化历史。

(3)油气成藏地球化学研究:采用地球化学分析方法,利用各种油气地球化学信息,分析油气藏的非均质性及其成因,研究油气运移的路径(运移地球化学)和充注特点。

(4)油气成藏动力学研究:重点研究油气运移的动力、运移方式、运移通道、运移方向以及运移距离,分析油气聚集的原理,恢复油气成藏过程,重建油气成藏历史,搞清油气成藏机理,建立油气成藏模式。在此基础上,开展油气成藏动力学系统研究,进行油气成藏动力学系统划分。

(5)油气藏分布规律及评价预测研究:这是油气成藏地质学研究的最终目的,它是在上述几方面研究的基础上,分析油气藏的形成和分布规律,进行资源评价和油气田分布预测,从而为油气勘探部署提供依据。

(二)研究重点

油气成藏地质学研究贯穿于油气勘探的始终,但在不同勘探阶段油气成藏地质学研究的重点有所不同。

在盆地早期评价和勘探阶段,油气成藏地质学研究的重点是基本成藏条件的评价与含油气系统的划分,进行有利分布区预测,目的在于掌握含油气盆地的成藏潜力、含油气系统的分

布及主要勘探方向。

在含油气系统评价和勘探阶段,油气成藏地质学研究的重点是含油气系统中油气的生成、运移、聚集和保存,进行油气成藏动力系统划分,研究各含油气系统油气富集的主要控制因素和油气分布规律,开展含油气系统的描述与评价,进行有利分布区带的预测。

在油气成藏动力系统的评价和勘探阶段,油气成藏地质学研究的重点是油气藏的成藏机理和成藏模式及其富集规律,开展油气成藏动力学系统描述与评价等,进行有利勘探目标预测。

二、油气成藏地质学的研究思路和方法

(一)研究思路

油气成藏地质学研究是综合运用各种地质与地球物理资料和信息,利用各种手段和方法,对油气藏形成的各成藏要素和成藏作用进行综合分析,恢复、重建油气成藏过程,分析油气成藏机理与分布规律,建立油气成藏模式,进行油气分布预测;其总的研究思路是:以现代油气成藏地质学理论为指导,以成盆—成岩—成烃—成藏研究为主线,以油气成藏机理与富集规律研究为核心,采用整体与局部研究相结合、宏观与微观研究相结合、静态与动态研究相结合、现状与历史研究相结合、地质综合研究与实验模拟技术相结合,深入开展相关研究工作。可见,油气成藏地质学研究的总体思路可以概括为“一个理论、一条主线、一个核心和五个结合”。

1. 一个理论——现代油气成藏地质学理论

所谓现代油气成藏地质学理论,是指石油地质学中一切与油气成藏有关的新理论,重点是油气成藏地球化学理论、油气成藏年代学理论、油气成藏动力学理论等。它们既是油气成藏地质学研究的重要内容,又是进行具体成藏研究所不可缺少的理论指导。因此,油气成藏研究必须及时吸收和借鉴现代油气成藏地质学理论,并以现代油气成藏地质学理论作为指导。

2. 一条主线——成盆—成岩—成烃—成藏研究

油气成藏研究虽然研究的是一个一个的油气藏,但由于油气藏的形成发生在沉积盆地中,油气藏与盆地的构造—沉积演化密切相关;另一方面,油气成藏过程又发生在具体的储层当中,储层的成岩演化与油气成藏也有着密切的联系;另外,油气藏的形成首先需要有机物质在烃源岩中生成,所以烃源岩的热演化历史和生排烃史对油气藏的形成同样具有十分重要的影响,因此,研究油气藏的形成和分布,就必须以成盆—成岩—成烃—成藏研究为主线,只有这样,才能对油气藏的形成过程及其形成和分布规律得出深刻认识,才能对油气藏的分布作出准确预测。

3. 一个核心——油气成藏机理与富集规律研究

油气成藏地质学研究尽管涉及的内容较多,但核心是油气藏的形成机理和富集规律,这也是油气成藏地质学研究中难度最大的部分,特别是油气成藏机理的研究。由于油气藏的形成过程发生在遥远的地质历史时期,不仅难以在实验室模拟再现,而且无现今可资参考和借鉴的实例,因此“将今论古”思想并不适用于油气成藏地质学研究。然而,一旦油气成藏机理与富集规律研究取得突破,油气分布预测的问题就会迎刃而解。

4. 五个结合

油气成藏地质学是一门综合性很强的学科,因此需要做好以下“五个结合”:

1)整体研究与局部研究相结合

所谓整体研究,就是要从盆地或区域性的油气成藏条件和成藏特点研究着手,然后由大到

小,直至开展对单个油气藏(田)进行重点解剖分析。同样,相反的过程,即由小到大、由局部到整体的研究也是不可或缺的,一个个单个油气藏(田)的深入解剖分析,是认识区域性油气成藏特征与油气富集规律的重要前提和基础。

2)宏观研究与微观研究相结合

所谓宏观研究与微观研究相结合,就是既要对油气藏进行宏观尺度上的研究,又要对其进行微观尺度上的分析。宏观研究主要是指对形成油气藏的烃源岩、储层、盖层、圈闭等要素以及油气藏的总体分布特征进行研究,而微观研究主要指的是在显微镜下对油气藏的形成和分布特征进行研究。

3)静态研究与动态研究相结合

所谓静态研究与动态研究相结合,就是既要对烃源岩、储层、盖层、圈闭等静态的成藏要素进行研究,以便搞清基本的成藏条件,又要对油气的生成、运移、聚集及后期调整变化等成藏作用进行研究,以便搞清油气藏的形成过程和形成机理。

4)现状研究与历史研究相结合

油气藏的形成属于地质历史事件,可以说“看不见,摸不着”,因此油气成藏地质学研究好比是“考古学”,或者类似“医生看病”。这就要求油气成藏研究将现状研究与历史研究相结合,从现今油气藏的剖析入手,运用各种信息和各种手段进行油气成藏过程研究与油气成藏历史恢复,从而为油气分布预测提供依据。

5)地质研究与实验分析技术相结合

除了地质研究外,先进的实验分析技术同样是油气成藏研究不可或缺的一个重要手段。对油气成藏研究来说,较重要的实验分析技术包括油气成藏地球化学分析技术、油气成藏年代学分析技术以及油气成藏动力学模拟技术等。

(二)研究方法和手段

油气成藏地质学的研究,主要采用的是石油地质综合研究与石油地质实验分析技术相结合的方法。其中采用的研究方法和手段除了石油地质综合研究外,主要有以下两方面。

1. 石油地质实验分析技术

石油地质实验分析技术包括有机地球化学实验分析技术、储层地质学实验分析技术、油气成藏年代学实验分析技术以及油气成藏动力学等方面的实验分析技术,近年来得到广泛应用的新技术有流体包裹体分析技术、同位素测年技术、原油含氮化合物分析技术以及非常规储层分析技术等。

2. 模拟技术

模拟技术包括物理模拟和数值模拟,主要用来解决油气成藏的机理问题。其中,物理模拟是采用真实材料(如岩心等)对成藏过程进行模拟,如岩心充注模拟实验;数值模拟主要是采用计算机软件,通过输入的各种地质参数,对油气成藏过程进行模拟。

参 考 文 献

- 戴金星. 2009. 中国煤成气研究 30 年来勘探的重大进展[J]. 石油勘探与开发, 36(3): 264—278.
- 戴金星, 黄土鹏, 刘岩, 等. 2010. 中国天然气勘探开发 60 年的重大进展[J]. 石油与天然气地质, 31(6): 689—698.
- 龚再升, 杨甲明. 1999. 油气成藏动力学及油气运移模型[J]. 中国海上油气(地质), 13(4): 235—239.
- 郝芳, 邹华耀, 姜建群. 2000. 油气成藏动力学及其研究进展[J]. 地学前缘, 7(3): 11—21.

- 郝芳,邹华耀,杨旭升,等.2003.油气幕式成藏及其驱动机制和识别标志[J].地质科学,38(3):413—424.
- 胡文瑞,翟光明,李景明.2010.中国非常规油气的潜力和发展[J].中国工程科学,12(5):25—29,63.
- 贾承造.2005.21世纪初中国石油地质理论问题与陆上油气勘探战略[M].北京:石油工业出版社.
- 贾承造,郑民,张永峰.2012.中国非常规油气资源与勘探开发前景[J].石油勘探与开发,39(2):129—136.
- 贾承造.2012.关于中国当前油气勘探的几个重要问题[J].石油学报,33(增刊1):6—13.
- 康永尚,湛卓恒,金之钧.1997.含油气系统油气成藏动力学[M]//中国石油学会石油地质专业委员会.中国含油气系统的应用与进展.北京:石油工业出版社:89—98.
- 康永尚,张一伟.1999.油气成藏流体动力学[M].北京:地质出版社.
- 林壬子,张敏.1996.油藏地球化学——石油地球化学的新进展[J].西安石油学院学报,11(1):8—14.
- 柳广弟.2007.石油地质学[M].4版.北京:石油工业出版社.
- 马永生,冯建辉,牟泽辉,等.2012.中国石化非常规油气资源潜力及勘探进展[J].中国工程科学,14(6):22—30.
- 诺斯 F K. 1994. 石油地质学[M]. 高纪清,等译,北京:石油工业出版社.
- 丘比特 J M, 英格兰 W A. 1997. 油藏地球化学[M]. 王铁冠,张枝焕,译,北京:石油工业出版社.
- 邱中建,邓松涛.2012a.中国非常规天然气的战略地位[J].天然气工业,32(1):1—5.
- 邱中建,邓松涛.2012b.中国油气勘探的新思维[J].石油学报,33(增刊1):1—5.
- 田世澄,陈建渝,张树林,等.1996.论成藏动力学系统[J].勘探家,1(2):20—24.
- 田世澄,陈永进,张兴国,等.2001.论成藏动力系统内的流体动力学机制[J].地学前缘,8(4):329—336.
- 王铁冠,张枝焕.1997.油藏地球化学的理论与实践[J].科学通报,42(19):2017—2025.
- 辛仁臣,田春志,窦同君.2000.油藏成藏年代学分析[J].地学前缘,7(3):48—54.
- 翟光明.2008.关于非常规油气资源勘探开发的几点思考[J].天然气工业,28(12):1—3.
- 翟光明,王世洪,何文渊.2012.近十年全球油气勘探热点趋向与启示[J].石油学报,33(增刊1):14—19.
- 赵靖舟.2002.油气成藏年代学研究现状及发展趋势[J].地球科学进展,17(3):378—383.
- 赵靖舟,等.2002.成藏动力系统的内涵及其勘探意义[J].中国石油勘探,7(4):16—17.
- 赵靖舟.2003.前陆盆地天然气成藏理论及应用[M].北京:石油工业出版社.
- 赵靖舟.李启明.2003.塔里木盆地油气藏形成与分布规律[M].北京:石油工业出版社.
- 赵靖舟.2005.幕式成藏理论的提出及其勘探意义[J].石油实验地质,27(4):315—320,326.
- 赵靖舟,等.2007.油气成藏地质学的内涵及其在石油地质学中的定位[J].石油与天然气地质,28(2):139—143.
- 赵靖舟.2012.非常规油气有关概念、分类及资源潜力[J].天然气地球科学,23(3):393—406.
- 赵文智,何登发.1996.含油气系统理论在油气勘探中的应用[J].勘探家,1(2):12—19.
- 赵文智,等.1999.石油地质综合研究导论[M].北京:石油工业出版社.
- 赵文智,何登发,池英柳,等.2001.中国复合含油气系统的基本特征与勘探技术[J].石油学报,22(1):6—13.
- 赵政璋,吴国干,胡素云,等.2005.全球油气勘探新进展[J].石油学报,26(6):119—126.
- 邹才能,张光亚,陶士振,等.2010.全球油气勘探领域地质特征、重大发现及非常规石油地质[J].石油勘探与开发,37(2):129—145.
- 邹才能,等.2011.非常规油气地质[M].北京:地质出版社.
- DEMAISON G, HUIZINGA B J. 1991. Genetic classification of petroleum systems[J]. AAPG Bulletin, 75(10): 1626—1643.
- ENGLAND W A. 1990. The organic geochemistry of petroleum reservoir[J]. Organic Geochemistry, 16(1—3): 415—425.
- HOOPER E D. 1991. Fluid migration along growth faults in compacting sediments[J]. J Petrol Geol, 4(2): 161—180.
- HUNT J M. 1990. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments[J]. AAPG Bulletin, 74(1):1—12.

- LARTER S R, Alpin A C. 1995. Reservoir geochemistry: methods, applications and opportunities[C]//CUBITT J M, ENGLAND W A. The geochemistry of reservoirs. London: Geology Society, 159 — 183.
- LEYTHAEUSER D, RUCKHEIM J. 1989. Heterogeneity of oil composition with in a reservoir as a reflection of accumulation history[J]. *Geochem Cosmochim*, 53(8): 2119 — 2123.
- MAGOON L B. 1988. The petroleum system: a classification scheme for research, exploration, and resource assessment[A]//MAGOON L B. Petroleum systems of the United States. USGS Bulletin, 1870, 2—15.
- MAGOON L B, DOW W G. 1994. The petroleum system: from source to trap[J]. *AAPG Memoir*, 75(3): 627.

第二章 油气成藏地球化学

油气成藏地球化学是有机地球化学与石油地质学相结合的产物。它主要采用现代地球化学分析测试技术,研究油气藏中流体和矿物的相互作用、油气藏流体的非均质性及其形成机理,探索油气充注、聚集历史与侵位成藏机制,为油气田的勘探提供依据。

第一节 油气成藏地球化学研究内容和方法及应用

一、油气成藏地球化学的研究内容

(一)油气运移研究

近年来,随着计算机技术和油气分析测试技术的进步,无论在油气运移机理研究上,还是在油气运移的地球化学追踪和油气运移的定量模拟技术上,都取得了长足的进步。尽管对油气初次运移的相态仍有较大的争论,但普遍认识是油气在烃源岩的不同演化阶段可能包含不同的运移相态,在未成熟—低成熟阶段可能以水溶相运移为主,在生油高峰期以连续油相运移、微裂缝间歇性排烃为主,而天然气的初次运移相态可以是水溶相、油溶相、游离相或扩散相中的一种或多种。在油气运移的地球化学追踪上,对地质色层效应的认识更加清楚,并提出了许多油气运移追踪的地球化学指标,尤其是含氮化合物的研究,为油气运移追踪提供了新的研究方向。在油气运移的定量研究上,发展了多种定量模型,并研制了二维和三维盆地模拟软件,有力地推动了含油气盆地的资源评价和油气勘探工作。油气运移研究,特别是地史上的油气运移研究是一项难度很大、涉及面甚广的课题,目前仍有许多基础理论需要进行更深入的研究,如油气运移过程中所发生的物理化学变化,地温场、地应力场和地压场之间的关系以及它们的不同配置对油气运移聚集的影响、油气运移的三维组分模拟等。总之,油气运移研究仍是油气成藏理论和油气勘探实践中一个既关键而又研究得十分薄弱的重大课题。

(二)油气成藏期次研究

长期以来,油气成藏期次研究一直是油气成藏研究的一个难点。传统的油气成藏期次分析主要从生、储、盖、运、聚、保各项参数有效配置,根据构造演化史、圈闭形成史与烃源岩生排烃史作出推断,常用的三个方法是根据烃源岩的主生烃期、圈闭形成期、油藏饱和压力分析油气藏形成期。20世纪90年代以来,油气成藏期分析开始寻求油气成藏的直接地球化学证据,主要是借助油气藏地球化学、储层有机岩石学及黏土矿物演变史(或成岩矿物的同位素分析)分析手段,进行流体历史分析,能够比较成功地确定油气藏的形成期,为油气藏演化史分析提供充分的证据。

(三)油气成藏过程研究

油气成藏机理和油气成藏过程研究主要用各种分析方法研究油气成藏期次与成藏过程,包括油气的生成、运移、聚集以及保存和破坏的各个环节。

二、油气成藏地球化学的研究方法

从原理上讲,常规的油气地球化学分析技术都可以应用于油气成藏地球化学研究。

(一)油气组成分析法

1. 轻烃分析法

轻烃是指沸程在 200℃ 以前的汽油馏分,主要为 C₅—C₁₀ 的化合物。轻烃(C₅—C₁₀)是原油中的重要组分,通常在原油中轻烃的含量约占 1/3,在凝析油中含量更高。它的含量与分布不仅与生烃母质有关,也与烃体系在地下所处的温度、压力有关。地球化学家早就开始利用轻烃组成特征来研究油气成因、运移等有关的一些地球化学问题。

轻烃采用气相色谱仪分析,色谱柱为 OV-101 石英弹性毛细色谱柱,柱长 80m,内径 0.2mm,柱效 3500 板/m。初始温度 30℃,升温速度 1℃/min,nC₈ 以后升温速度为 4℃/min,终止温度 250℃,分流比 1:100。载气为 He,氢火焰离子检测器,空气速度 300mL/min,氢气速度 30mL/min。

轻烃气相色谱分析的样品可以是原油样品,也可以是凝析油或天然气样品。如果是凝析油样品,可直接进样分析;原油样品须用氦气抽提法进样以脱去沥青质;若是天然气样品,需要对所分析的天然气进行浓缩后再分析,只需在气相色谱仪前端连接一个天然气浓缩装置即可。分析结果如图 2-1 所示,化合物定性如表 2-1 所示。

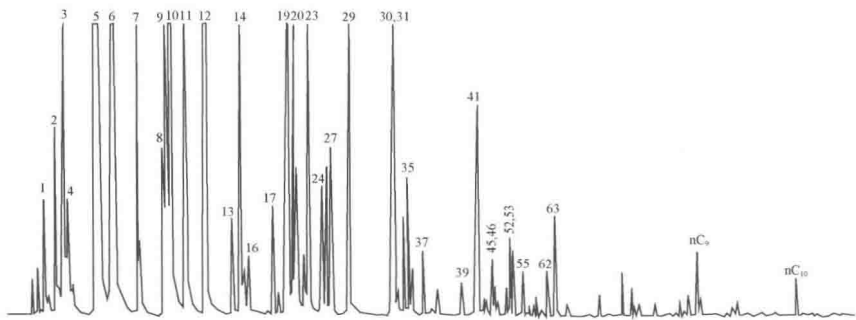


图 2-1 轻烃气相色谱图

表 2-1 轻烃化合物鉴定表

峰号	化合物名称	峰号	化合物名称
1	正丙烷	11	3-甲基戊烷
2	2-甲基丙烷	12	正己烷
3	正丁烷	13	2,2-二甲基戊烷
4	2,2-甲基丙烷	14	甲基环戊烷
5	2-甲基丁烷	15	2,4-二甲基戊烷
6	正戊烷	16	2,2,3-三甲基丁烷
7	2,2-二甲基丁烷	17	苯
8	环戊烷	18	3,3-二甲基戊烷
9	2,3-二甲基丁烷	19	环己烷
10	2-甲基戊烷	20	2-甲基己烷

续表

峰号	化合物名称	峰号	化合物名称
21	2,3-二甲基戊烷	43	2-甲基,3-乙基戊烷
22	1,1-二甲基环戊烷	44	1,1,2-三甲基环戊烷
23	3-甲基己烷	45	2-甲基庚烷
24	1,顺 3-二甲基环戊烷	46	1 顺 2,反 4-三甲基环戊烷
25	1,反 3-二甲基环戊烷	47	4-甲基庚烷
26	3-乙基戊烷	48	3,4-二甲基己烷
27	1,反 2-二甲基环戊烷	49	1 顺 2,反 4-三甲基环戊烷
28	2,2,4-三甲基戊烷	50	3-甲基庚烷
29	正庚烷	51	1,顺 3-二甲基环己烷
30	甲基环己烷	52	1 顺 2,反 3-三甲基环戊烷
31	1,顺 2-二甲基环戊烷	53	3-乙基己烷
32	1,2-二甲基己烷	54	1,反 4-二甲基环己烷
33	1,1,3-三甲基环戊烷	55	1,1,2-三甲基环己烷
34	乙基环戊烷	56	1-甲基,顺 3-乙基环戊烷
35	2,5-二甲基己烷	57	2,2,5-三甲基己烷
36	2,4-二甲基己烷	58	1-甲基,反 3-乙基环戊烷
37	1 反 2,顺 4-三甲基环戊烷	59	1-甲基,反 2-乙基环戊烷
38	3,3-二甲基己烷	60	1-甲基,1-乙基环戊烷
39	1 反 2,顺 3-三甲基环戊烷	61	2,2,4-三甲基己烷
40	2,2,3-三甲基己烷	62	1,反 2-二甲基环己烷
41	甲苯	63	正辛烷
42	2,3-二甲基己烷		

2. 中等分子质量烃分析法

中等分子质量烃分析是油油对比、油藏连通性和混采油井分层产能等研究的新方法。油藏中原油的 C₉—C₂₅间异构烷烃和环烷烃类化合物指纹差异至少部分地预示着烃源岩有机相的差异,所选取的这些化合物的碳骨架类似于生物标志物的碳骨架(R. J. Hwang 等,1994),异构烷烃和反异构烷烃在原油和烃源岩中的保留与现今细菌群中的 2-甲基脂肪酸、3-甲基脂肪酸有很强的成因联系。因此能够利用 C₉—C₂₅间异构烷烃和环烷烃类化合物气相色谱指纹来区分油层中原油的细微差异,研究它们的成因联系。

中等分子质量烃分析采用气相色谱仪,色谱柱为 OV-101 石英弹性毛细色谱柱,柱长 50m,内径 0.2mm,载气为 He,分流比 60:1,柱内流速 1mL/min,程序升温,初始温度 30℃,恒温 1min 后以 1℃/min 的速率升温至 50℃,以 4℃/min 的升温速率升温至 300℃,恒温 30min,进样器温度为 250℃,检测器温度 300℃,FID 检测。分析结果如图 2-2 所示。

3. 非烃中含氮化合物分析法

油藏流体中氮化化合物的分布、组成及含量的变化是研究原油运移、聚集以及成藏历史的重要内容。但这类非烃化合物分析的关键在于预处理。由于烷基苯酚和中性含氮化合物在原油中是一类具极性的微(痕)量组分,因而常规的分离分析流程复杂、难度大。尽管如此,许多学