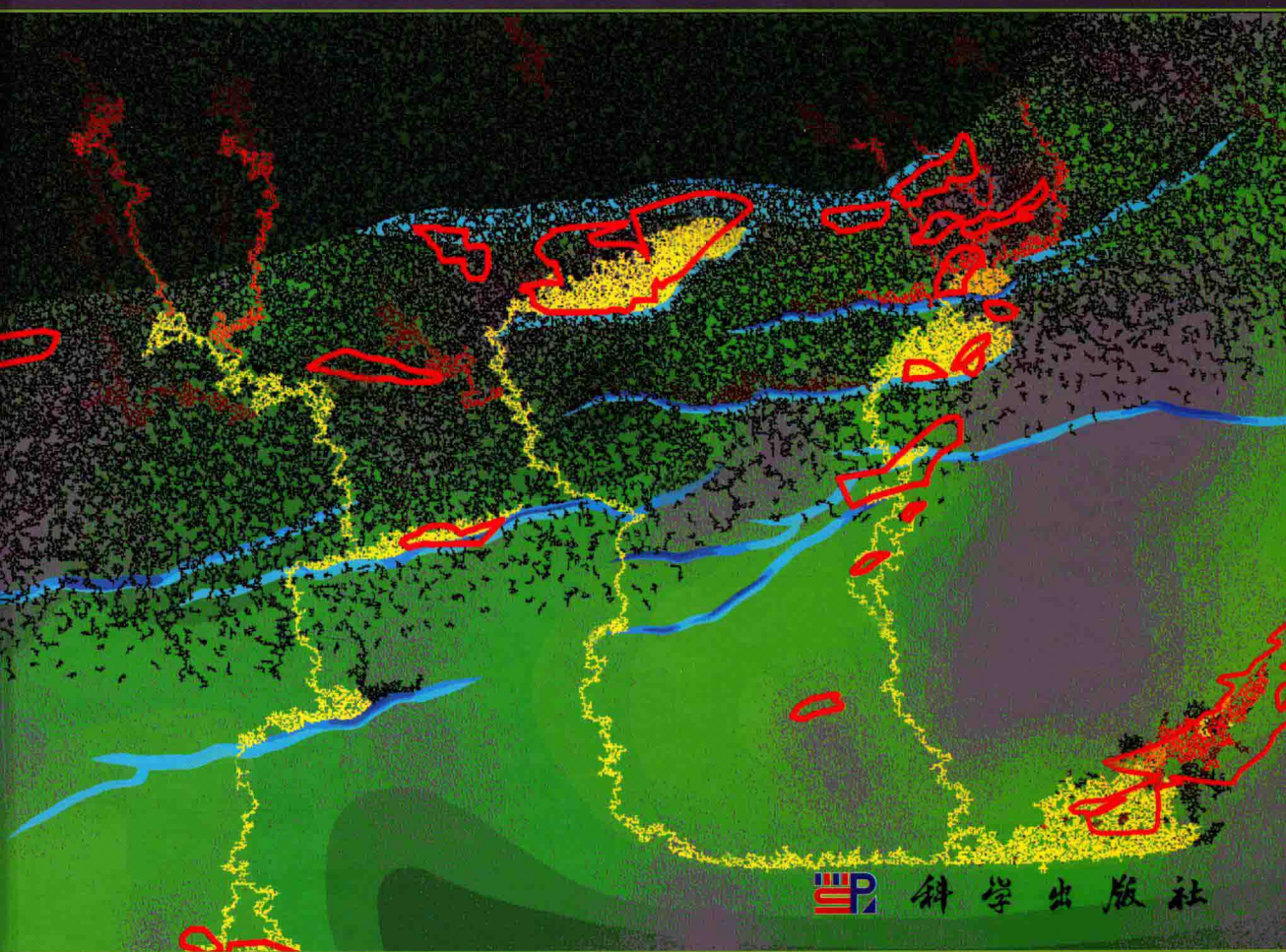


油气运移

——定量动力学研究与应用

罗晓容 张立宽 雷裕红 等 著



 科学出版社

油 气 运 移

——定量动力学研究与应用

罗晓容 张立宽 雷裕红 等 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书介绍了作者多年来在油气运移方向上的研究工作、方法体系、成果认识与实际应用。通过物理模拟实验和数值模拟分析,研究油气运移的机理和过程,建立油气源、运移动力和运移通道耦合的运移模型;提出含油气盆地中输导体系连通性及输导能力的量化表征方法;通过对盆地中空有限的油气成藏系统的划分,定量地分析不同油气成藏期的运移过程,估算在不同方向上的油气运移量,进而提出油气资源及其分布的评价方法。本书还以渤海湾盆地东营凹陷南部斜坡东段为例,阐明油气运移理论与方法在实际中的应用,以油气运移为主线,将油气成藏的各个要素和过程有机地串联起来,开展定量化的成藏动力学研究,认识油气运移方向和聚集范围,评价油气勘探潜力。

本书适合从事石油勘探的科学工作者,以及油气地质专业的高等院校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

油气运移:定量动力学研究与应用/罗晓容等著. —北京:科学出版社, 2018. 1

ISBN 978-7-03-055803-9

I. ①油… II. ①罗… III. ①油气运移 IV. ①P618.130.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第300357号

责任编辑:焦 健 韩 鹏/责任校对:韩 杨

责任印制:肖 兴/封面设计:黄华斌

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年1月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2018年1月第一次印刷 印张:24 1/2

字数:580 000

定价:298.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

石油天然气地质学作为石油与天然气勘探开发的理论核心，是随着人类大量的油气勘探和开发实践活动，不断积累有关油气生成、聚集与分布规律等知识，逐渐形成的一门集理论性与应用性于一体的学科。1885 年美国学者 White 提出的背斜成藏理论是最早的油气勘探理论，随后人们在含油气盆地中心区和深部拗陷区发现了越来越多的油气资源，盆地中心与斜坡地带隐蔽性的岩性、地层圈闭成为勘探的主要目标，石油天然气地质理论日趋完善。在长期研究中，石油地质学家发现在油气生成、运移、聚集成藏的地质过程中，油气运移最为复杂，对认识油气成藏过程也最为关键。

作为流体的石油天然气以其具有流动性而不同于固体矿产资源，其在烃源岩内生成后需经历漫长而复杂的运移过程方能富集形成各种常规油气藏。长期以来，人们只能定性地分析这一动力学过程，误差极大。因而尽管油气运移过程在石油天然气地质学体系中十分重要，但却一直是研究认识最为薄弱的环节，这也是世界范围内油气勘探风险极高的主要原因之一。

十多年来，罗晓容研究员及其所领导的研究团队在油气运移方向坚持开展深入细致的研究工作。本专著系统地介绍了他们在此方面的理论认识、方法流程和实际应用过程。他们通过物理模拟实验和数值模拟分析，研究油气运移的机理和过程，定量描述和分析运移路径特征，建立适用的运移数值模型，最终建立了以非均匀路径形成演化过程为核心的运移理论。他们开展定量化的运移动力学研究，形成了以盆地模型和逾渗理论为基础的运移定量研究方法，解决了运移研究从理论认识到实际应用、从微观实验观察到宏观描述应用的方法学问题。他们针对我国叠合盆地多期多源油气运聚成藏的事实，提出了限定时空范围的模型化研究思想，建立了可量化描述油气运移路径和聚集区带的输导体系动力学模型，为破解长期制约油气藏定量评价和预测的难题提供了有效可行的方法手段。

本专著展示了油气运移方面的理论认识突破，发展了石油天然气地质学理论。所提出的油气运移新理论认识及定量化的技术方法在中国渤海湾、鄂尔多斯、塔里木、柴达木等多个盆地推广应用于油气资源评价、勘探目标预测，对发现新储量发挥了重要指导作用，取得了明显成效，获得了业界的认可和好评。

罗晓容

2017 年 12 月 18 日

前 言

石油天然气都是流体矿产资源。油气自烃源岩生成，经初次运移到输导层内后发生二次运移，最后在运移动力和阻力达到平衡的圈闭内聚集成藏。油气运移过程发生在漫长地质历史时期，地下深处。复杂的地质条件和多期强烈的变动使得油气运移、聚集的机理和过程十分复杂。长期以来人们只能定性地分析运移过程，所取得的认识往往与实际相差甚远，以至于石油地质学理论研究长期处于定性的分析和推论阶段，这也是世界范围内油气勘探风险极高的主要原因之一。

利用动力学方法追踪油气运移路径、研究认识油气成藏过程是石油地质学家一直努力的方向。自圈闭理论的提出，到生烃动力学和排烃理论，再到含油气系统，石油地质学理论的每一次飞跃性进步都可视为油气运移机理和过程认识方面突破的结果。就当前的科学技术水平与石油地质学研究各方面进展而言，以油气运移研究为核心的综合定量油气成藏动力学研究时代已经到来，呈现出了石油地质学研究发展的必然趋势。

我们研究团队多年来的工作主要集中在碎屑岩盆地，而对碳酸盐岩及其他岩石类型的储集体、输导体的研究不够系统，因而本书中并未包括对这些岩石类型中油气运移的研究与认识。

本书共分五章。

第1章归纳和总结前人有关油气运聚散的定量分析和动力学研究认识，分析油气流动过程中的通道特征和动力关系，综述对油气运、聚、散之间的统一性的认识，讨论油气运移研究与认识在实际含油气盆地应用的思路与方法。

第2章介绍系列的运移机理物理模拟实验，提出对于石油运移的路径特征、动力关系及影响因素的认识，并在此基础上建立起以浮力为主要运移动力、以侵入逾渗理论为方法基础的运移数学模型。

第3章以细致的地质解剖和模拟实验研究为基础，从不同类型输导体作为油气运移通道的动力学机理出发，探索油气运移过程中输导体系连通性及输导能力的量化参数和评价方法，确定关键成藏时期油气输导体系的构成和输导格架模型，进而定量地分析其非均匀性特征及对油气运聚过程的影响。

第4章基于物质平衡原理和油气成藏动力学研究的思想，根据油气在不同的运移聚集阶段和相应阶段的散失机理，求取油气的损失量；以油气成藏系统作为基本单元估算油气资源，进而提出油气资源及其分布的评价方法。

第5章以渤海湾盆地东营凹陷南部斜坡东段为实际应用地区，分析油气成藏条件，研究主要输导体及其复合而成的输导体系的结构特征和物性变化，通过油气成藏动力学研究工作，认识复合输导体系的油气运移效率，指出油气运移方向和聚集范围，评价油气勘探



潜力。

本书内容根据研究团队多年来的油气运移研究成果总结而成，体现了团队理论研究与实际需求相结合、坚持开展定量化的动力学研究的思路 and 方向。本书由罗晓容、张立宽、雷裕红等执笔完成，研究团队成员主要有：李铁军、张发强、赵树贤、郑大海、宋海明、张立强、岳伏生、周波、侯平、张刘平、陈占坤、陈瑞银、王兆明、武明辉、杨文秀、李宏涛、许建华、闫建钊、宋成鹏、赵健、赵洪等，以及法国科学研究中心 G. Vasseur 和 D. Loggia、美国密苏里理工大学杨晚等长期合作者。团队成员都不同程度地参与了相关研究工作，并做出了重要贡献。

研究过程中，研究团队与相关油田单位、科研院所及国外有关机构展开了广泛的合作与交流。胜利油田、塔里木油田、青海油田、大港油田、长庆油田、延长油田、南海西部油田、大庆油田采油九厂等石油企业的地质研究院相关领导及研究人员给予了充分的支持和热情的帮助。研究团队多年来得到国家自然科学基金、国家重点基础研究发展计划项目、国家重大科技专项项目和中国科学院科研项目的经费支持。在此一并致谢。

2017 年 9 月 20 日

目 录

序 前言

第1章 绪论	1
1.1 油气二次运移	1
1.1.1 油气运移基本认识	1
1.1.2 油气运移动力	3
1.1.3 油气运移通道	6
1.1.4 油气运移的路径特征和形成机理	12
1.1.5 油气运聚的动力学模式	15
1.1.6 油气运移示踪与定年	17
1.2 地质动力学与定量分析方法	20
1.2.1 地质动力学	20
1.2.2 地质模型建立	21
1.2.3 定量研究的方法	22
1.3 油气成藏动力学研究	26
1.3.1 成藏动力学研究的发展历程与作用	26
1.3.2 油气成藏动力学的概念和内涵	28
1.3.3 油气成藏动力学研究的主要内容及方法	31
第2章 油气二次运移机理与过程	36
2.1 石油二次运移物理模拟实验	36
2.1.1 实验装置与观测系统	36
2.1.2 运移路径的形成过程	41
2.1.3 运移路径中的再次运移	53
2.1.4 路径饱和度与路径内含油饱和度	56
2.1.5 单个裂隙中油运移实验及特征分析	67
2.2 油气二次运移机理与过程	70
2.2.1 油气运移的动力学表征与运移模式图	70
2.2.2 运移路径形成、变化的机理与过程	72
2.3 油气二次运移的数学模拟分析	82
2.3.1 MigMOD 模型及其适用性分析	82
2.3.2 概念地质模型中的油气运移模拟	87



2.3.3	油气运移路径的非均匀性及影响因素	90
2.3.4	实例分析：巴黎盆地中侏罗统成藏系统中的油气运移	98
第3章	油气输导体系及其量化表征	100
3.1	砂岩输导层及其量化表征	100
3.1.1	输导层的概念	101
3.1.2	输导层的划分	102
3.1.3	输导层模型的建立	104
3.1.4	输导层的几何连通性	105
3.1.5	输导层的流体连通性	107
3.1.6	输导层输导性能的量化表征	110
3.2	断层输导体及其量化表征	112
3.2.1	影响断层启闭性的地质因素分析	113
3.2.2	断层启闭性量化研究思想和模型	115
3.2.3	断层连通概率的概念	120
3.2.4	断层启闭性量化参数的有效性评价	122
3.2.5	断层输电体的量化表征	132
3.3	不整合相关输导体	138
3.3.1	不整合运移通道的结构特征	138
3.3.2	不整合相关输电体的空间分布	141
3.3.3	不整合输导体模型	147
3.4	复合油气输导格架的建立及其量化表征	149
3.4.1	复合输电体系的构建原则	149
3.4.2	复合输导格架建立的方法	151
3.4.3	复合输导格架的量化表征	155
第4章	油气运聚效率与资源分布定量评价方法	159
4.1	油气初次运移与排烃量估算	159
4.1.1	油气初次运移的动力学条件分析	159
4.1.2	烃源岩排烃量的估算	165
4.2	油气二次运移途中损失量估算方法	174
4.2.1	油气二次运移过程的模式	175
4.2.2	油气运移径道比	177
4.2.3	二次运移途中损失量估算模型	182
4.2.4	运移途中损失量估算的实例	183
4.3	非工业油气聚集损失量估算	189
4.3.1	计算原理和方法	189
4.3.2	非工业聚集量估算的实例	190
4.4	油气资源量及空间分布定量评价	193
4.4.1	油气资源评价的物质平衡方法	193

4.4.2	运移路径中油气运聚量评价的实现	195
4.4.3	油气运聚效率及资源分布评价的方法流程	196
4.4.4	研究方法的适用性检验	198
第5章	东营凹陷南斜坡东段油气运聚动力学研究	203
5.1	地质背景和石油地质条件	203
5.1.1	构造特征	203
5.1.2	地层发育特征	204
5.1.3	构造演化及沉积充填历史	207
5.1.4	石油地质条件	210
5.1.5	油藏类型及分布特征	212
5.2	油气运聚动力学背景的定量研究	217
5.2.1	盆地地质模型建立与埋藏演化史恢复	217
5.2.2	温压场特征及演化过程恢复	229
5.2.3	烃源岩排烃史恢复	249
5.3	油气成藏期次及运聚系统的划分	256
5.3.1	油气运移的地球化学特征分析	257
5.3.2	油气成藏年代学分析	270
5.3.3	油气运聚系统划分	276
5.4	复合输导格架建立及量化表征	281
5.4.1	砂岩输导层量化表征	282
5.4.2	断层输导体的量化表征	308
5.4.3	复合输导格架的建立	325
5.5	油气运聚效率评价及资源分布预测	334
5.5.1	油气运聚损失量的计算	335
5.5.2	油气资源潜力评价	342
5.5.3	油气运聚模拟及资源分布评价	344
5.5.4	有利勘探目标区预测与评价	350
参考文献		353

第 1 章

绪 论

沉积盆地内油气自烃源岩内生成，经初次运移进入输导体内发生二次运移，最后在运移动力和阻力达到平衡的圈闭内聚集成藏（Hobson, 1954; England *et al.*, 1987; Magoon and Dow, 1992）。油气运移是最能反映油气作为流体矿产本质和动力学特征的地质过程，因而是石油地质学，特别是油气成藏动力学研究的核心内容（张厚福等, 2000; 李明诚, 2013），更是油气勘探开发中必须解决的实际问题（陈荷立, 1991; 罗晓容, 2003）。油气运移往往经历复杂的地质过程，受到自然界多种动力学因素的影响和制约（张厚福、方朝亮, 2002; 李明诚, 2013）。这种发生在地下的历史过程无法直接观察，甚至很难获得其留下的痕迹（Schowalter, 1979; Dembicki and Anderson, 1989; Catalan *et al.*, 1992），长久以来是石油地质学中研究最薄弱的环节（陈荷立, 1988; 罗晓容, 2003; 李明诚, 2013）。

本章针对盆地油气地质学的特点，归纳和总结前人有关油气运聚散的定量分析和动力学研究认识，分析油气流动过程中的通道特征和动力关系，综述对油气运、聚、散之间的统一性的认识，讨论油气运移研究与认识在实际含油气盆地应用的思路和方法。

1.1 油气二次运移

尽管油气运移和聚集受多种因素制约，涉及学科多、研究难度大，但国内外学者从未停止在此方面的研究和探索（Hobson, 1954; 陈荷立, 1988; Hunt, 1990; 罗晓容, 2003; 金之钧、张发强, 2005; 李明诚, 2013）。近年来，随着油气勘探与油气地质认识深化、新技术方法应用以及相关学科的发展等，油气运移研究在运移动力、油气输导体系、运移聚集动力学机理、油气充注年代及油气运移地化示踪等方面取得了重要进展，这些研究成果和认识为深入开展油气运移作用的动力学研究提供了基础。

1.1.1 油气运移基本认识

广义地，油气进入储集层或输导层内以后的运移过程都称为二次运移（Hobson and Tiratsoo, 1981; Allen and Allen, 1990; Mann *et al.*, 1997; 李明城, 2013）。这样定义主要是考虑到油气自烃源岩初次运移出来以后所处的运移环境和动力学条件基本相似（陈荷立, 1988; Hunt, 1990; 张厚福等, 2000; 李明诚, 2013）。

一般来说，油气初次运移的相态决定了二次运移的相态（李明城, 2013）。若以油气



聚集成藏为研究目的,油气的二次运移以游离相态占绝对优势 (Ungerer *et al.*, 1984, 1990; Mann *et al.*, 1997)。McAuliffe (1979) 根据温度对于石油在水中溶解度的影响,指出当地温梯度为 $3.6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 时,石油每向地表方向运移 100m ,只能分离出百万分之 0.5 的溶解油,考虑到石油本身在水中的溶解度就很有限,石油以水溶相进行二次运移的效率很低。而石油在地层中扩散运移的速率太低,对于石油聚集的意义不大 (李明诚, 2013)。天然气的运移相态可能更为多样 (陈荣书, 1986)。游离态天然气与水之间的密度差比油水密度差大得多,而在同样的地质条件下气水界面张力与油水界面张力相差无几 (李明诚, 2013),因而游离态也是天然气运移的主要相态。天然气二次运移和聚集过程中烃类扩散作用和在水中的溶解作用也很重要 (郝石生等, 1991, 1994)。天然气在油中的溶解度很大,天然气在溶解于油的状态下运移,在有利的温压条件下解析出来也是天然气运移聚集的重要方式 (Larter and Mills, 1991)。

油气作为流体矿产,其形成、运移、聚集以及聚集成藏后的破坏和散失都是在充满水的岩石空间 (包括孔隙、裂隙、溶洞等) 内进行的 (张厚福等, 2000)。在这些通道中,油气得以运移主要取决于通道及其周围的水动力、毛细管力及油气在孔隙水中的浮力三者间的平衡关系 (Hubbert, 1953; Berg, 1975; Schowalter, 1979; England *et al.*, 1987; 王震亮、陈荷立, 1999)。油气在地层空间中时刻保持着流动的趋势,其在地质历史中的状态、位置及其变化取决于在任一时刻作用于其上的力之间的平衡关系。从动力学角度,油气的聚集是油气运移过程中的一种特殊情况,油气圈闭就是可使油气运移动力与阻力相互平衡并使油气停止不动的部位。油气的聚集、散失过程都是油气运移的不同动力条件下的表现形式,其动力关系和流体流动特征也是统一的 (罗晓容, 2008)。

除了输导岩石的孔隙空间,二次运移的通道还可能是岩石中的溶孔、溶洞、裂隙,以及断裂带和不整合面 (张厚福、张万选, 1989)。由于油气运移的动力平衡关系和通道特征,油气的二次运移既可能沿着输导层或不整合面侧向运移,也可能沿着断裂穿层而过,发生垂向运移 (Hobson and Tiratsoo, 1981; 张厚福、张万选, 1989)。运移的距离在垂向上取决于盆地内地层的厚度和断裂在垂向上的延伸距离,可达数千米 (解习农等, 1997; 郝芳等, 2004)。只要参加运移的油气量足够,运移通道连续性好,在侧向上几十公里乃至数百公里的运移距离也是可能的 (王尚文, 1983; Allen and Allen, 1990)。

油气在盆地内的二次运移是一个极不均一的过程 (McNeal, 1961; Harms, 1966; Smith, 1966; Berg, 1975; Schowalter, 1979; Dembicki and Anderson, 1989; 张发强等, 2003; Luo, 2011; Luo *et al.*, 2015)。可作为通道的地质体往往具有非均质性和不连续性,使得油气运移和聚集过程十分复杂,如输导层和储集层的岩性、物性的空间变化 (Schowalter, 1979),断裂的分隔和连通 (Hobson, 1954; Allan, 1989) 等。油气总是沿着运移通道内动力和阻力差值最大的优势路径发生运移,只有那些处在优势运移路径上的有效圈闭才能聚集成藏 (郝芳等, 2000)。即便是在十分均匀的孔隙介质内,油气的运移也是沿着部分通道运移 (Dembicki and Anderson, 1989; Catalan *et al.*, 1992; Luo, 2011),运移通道的体积大约只占全部输导体的 $1\% \sim 10\%$ (Schowalter, 1979; Luo *et al.*, 2007)。但在非均质性的输导体内,运移路径将相当复杂 (Luo *et al.*, 2015; 罗晓容等, 2016a, 2016b),运移路径在输导体中所占的比例可能相当的高 (Karlsen and Skeie,

2006), 甚至可以视为油气聚集 (Luo *et al.*, 2015)。

油气在孔隙介质中的物理运移速度很快 (Schowalter, 1979; Dembicki and Anderson, 1989; Catalan *et al.*, 1992; Luo *et al.*, 2004; Vasseur *et al.*, 2013)。但从实际地质条件下油气通过运移而形成具有工业性规模的油气藏的角度, 油气在地下的运移速度往往并不仅取决于运移动力、阻力差异和通道输导性, 更主要取决于油气源的供给速度。在盆地地质条件下, 油气运移是一个由无数次物理运移作用组合而成的、相对漫长的地质过程 (Zhang *et al.*, 2010; 罗晓容等, 2012)。

油气运移的方向总体上由盆地中心向边缘运移, 不同类型、结构和形状的盆地油气二次运移的方向也不相同 (Pratsch, 1986)。在运移动力和输导格架联合控制下的油气运移过程, 其时空演化决定了油气最终聚集成藏的部位和运聚效率 (Hao *et al.*, 2007; Luo *et al.*, 2007)。在任何时刻, 任何条件下, 油气总是沿着阻力最小的路径发生运移 (罗晓容, 2008)。

1.1.2 油气运移动力

游离态油气在通道里如何运移, 主要取决于通道及其周围的水动力、毛细管力及油气相对于孔隙水的浮力三者间的平衡关系 (Hubbert, 1953; Berg, 1975; Schowalter, 1979; England *et al.*, 1987; 陶一川, 1993)。其中浮力始终是油气二次运移的动力, 而水动力和毛细管力在油气运移过程中是动力还是阻力则要进行具体分析。水动力不仅产生于承压水头的差异所造成的流体流动 (Hubbert, 1953), 过剩压力不同的地层间在水动力连通条件下的瞬时流体流动也可产生重要的水动力 (England *et al.*, 1991; Luo *et al.*, 2003; 郝芳等, 2004)。如果水流动方向与油气所受的浮力方向一致, 水动力就是促使油气运移的动力, 否则就成为阻碍油气运移的阻力 (张厚福等, 2000; 罗晓容, 2003; 李明诚, 2013)。决定毛细管力在石油运移中起动力还是阻力作用主要取决于介质颗粒表面的润湿性, 当孔隙介质呈亲水时, 毛细管力对油气运移起阻力作用, 而当孔隙介质呈亲油时, 毛细管力则为油气运移的动力 (张博全、王岫云, 1989; 沈平等, 1995)。地层中, 岩石长期浸泡在地层水中, 因此通常认为地层岩石是亲水的, 毛细管力是石油二次运移的阻力。但当岩石受到极性流体的作用, 岩石中部分颗粒将改变其表面润湿性, 形成所谓的混合润湿孔隙介质 (Kovscek *et al.*, 1993; Robin *et al.*, 1995), 有利于油气的运移 (齐育楷等, 2015)。但无论毛细管力所起的作用如何, 油气二次运移的主要方向主要取决于水动力与浮力合力的方向 (Hindle, 1997; 张厚福等, 2000)。

Hubbert (1953) 将水动力学的思想和方法引入油气运移的研究, 为确定油气二次运移的动力提供了方便且实用的方法 (England *et al.*, 1987; 李明诚, 2013)。Hubbert (1953)、Hubbert 和 Willis (1957) 完整地在油气运移研究中引入了流体势的概念, 将势定义为单位质量的流体相对于基准面所具有的势能:

$$\Phi = gz + P/\rho \quad (1.1)$$

式中, Φ 为流体势, m; z 是观察点到基准面之间的距离, m; P 为观察点处流体的压力, MPa, 在静水条件下为静水压力, 而在动水条件下为异常压力; g 为重力加速度; ρ 是流



体的密度, kg/m^3 。在地质条件下, 流体势是地下单位质量的流体相对于基准面所具有的机械能总和 (Hubbert, 1953)。由于水、油密度不同, 油的流体势可以在水势基础上, 考虑油在水中的浮力获得 (Hubbert, 1953), 即

$$\Phi_o = \frac{\rho_w}{\rho_o} \Phi_w - \frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_o} gz \quad (1.2)$$

式中, Φ_w 和 Φ_o 分别为水和油的流体势; ρ_w 和 ρ_o 分别是水和油的密度。天然气在水中的流体势也可类似考虑, 只不过气势计算中必须考虑温度压力因素的影响, 公式为

$$\Phi_g = \frac{\rho_w}{\bar{\rho}_g} \Phi_w - \frac{\rho_w - \bar{\rho}_g}{\bar{\rho}_g} gz \quad (1.3)$$

式中, Φ_g 为天然气的流体势; $\bar{\rho}_g$ 是从观察点到基准面的天然气平均密度, 可由气体的状态方程结合经验图版 (Weast, 1975) 获得, 即

$$\bar{\rho}_g = \int d\rho_g(P, T) \quad (1.4)$$

为了便于在油气运移及聚集研究中应用, Hubbert 和 Willis (1957) 进一步从流体驱动力的角度对流体势公式 [式 (1.1)] 进行了推导:

$$dE = -\text{grad}\Phi = g + \frac{1}{\rho} \text{grad}P \quad (1.5)$$

由式 (1.2) 可得

$$E_o = \frac{\rho_w}{\rho_o} E_w - \frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_o} g = \frac{\rho_w}{\rho_o} E_w + v_o(\rho_o - \rho_w)g \quad (1.6)$$

式中, E_w 和 E_o 分别为水和油的驱动力; v_o 是油的比容。因而, 上式右边第二项代表了单位质量的油在水中的浮力, 而右边第一项则将水动力放大了 ρ_w/ρ_o 倍, 相当于将原先作用于单位质量的水上的力换算成作用于单位质量油上的力 (陶一川, 1993)。由于气体的密度更小, 因而作用于天然气上的动力更大。

Hubbert (1953)、Hubbert 和 Willis (1957) 定义的油气水势综合了油气二次运移动力之间的相互关系, 表征了油气运移在动力学上的差异及油气聚集过程中水动力的作用。但在油气水势的定义中, 因基准面的选择是任意的, 推导出的油气势及相应的驱动力较为抽象和难以理解, 应用时也不方便。因而, 一些学者 (Dahlberg, 1982; Schowalter, 1979; Lerche and Thomsen, 1994) 在探讨水动力对油气聚集的作用时, 虽然都采纳了 Hubbert 的油气势概念, 但在运移动力的计算中, 都直接采用了动水条件下具一定稳定油柱高度的流线动力分析方法。

为了在运移动力中考虑毛细管力的作用, England 等 (1987) 重新推导了油气势公式, 他们将基准面放在沉积水体的表面, 流体势的定义为将单位体积的流体从基准面搬移到地下某一观察点需做的功:

$$\Phi = mgz + PV + P_c V \quad (1.7)$$

式中, Φ 为流体势; z 是观察点到基准面之间的距离; P 为观察点处的流体压力; P_c 是观察点处两相流体共存时地层的毛细管力; m 是单位体积流体的质量。对于水的流动, $P_c=0$ 。

油势 Φ_o 可以表示为水势 Φ_w 的函数:

$$\Phi_o = \Phi_w + (\rho_w - \rho_o)gz + P_c \quad (1.8)$$

同样,天然气势 Φ_g 可以表示为

$$\Phi_g = \Phi_w + (\rho_w - \bar{\rho}_g)gz + P_c \quad (1.9)$$

式 (1.8) 和式 (1.9) 中,右边第一项是水势,即水动力的作用,第二项可以看作油、气在水中的浮力将单位体积的油气搬运距离 z (从观察点到基准面的距离) 所做的功,第三项为油气在流动时所受到的毛细管阻力。同样,可以将流体势式 (1.7) 转变成流体驱动力:

$$F = -\frac{d\Phi}{dz} = -\nabla P + \rho g - \nabla P_c \quad (1.10)$$

同样,对于水而言,毛细管力梯度 $\nabla P_c = 0$,驱动力就是作用于观察点流体之上的压力梯度与该单位体积流体重量的合力。

理论上,在流体势中考虑毛细管力可以统一考虑输导层内部及其与盖层或遮挡面之间的油气势差的相互关系。这在定性的油气运聚分析中可能会比较方便 (郝石生等, 1994),但在定量分析油气二次运移的动力问题时就会产生一些困难 (李铁军、罗晓容, 2005)。如盖层的毛管力就不可能在公式中考虑而必须首先假设盖层完全封闭,然后考虑输导层或储集层内的毛细管力的分布,在得出油气势分布后再计算盖层对封闭运移或聚集油气的可能性。实际上,在不考虑毛细管力的静水条件下,England 等 (1987) 定义的油气势可以很好地与地表上重力势的概念相对应:

$$\Phi_o = v_o(\rho_w - \rho_o)gz \quad (1.11)$$

式中, v_o 为单位体积的油。若将浮力 $v_o(\rho_w - \rho_o)g$ 看做是重力 mg ,那么油气势的概念和重力势的概念完全一致。Dahlberg (1982) 借用一个重力作用下的小球在波状起伏的界面向下方滚动表现出的运动规律,来说明油气在油气势作用下运移的情况 (图 1.1)。该图从左至右反映了小球在重力下下滚的情形,在这个界面的大部分地区小球都不能停止下

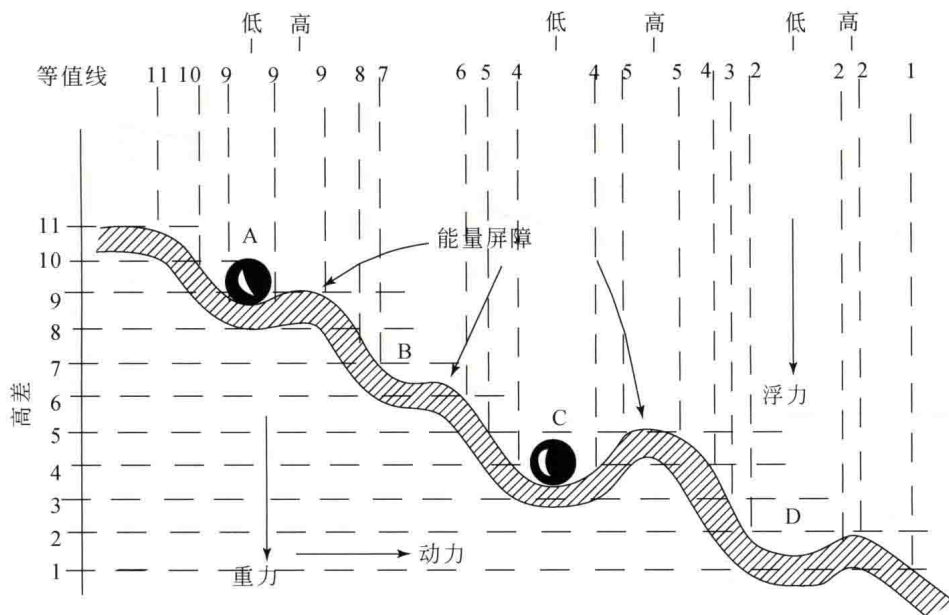


图 1.1 小球在重力下沿一个波状起伏的界面向下方滚落的动力学模式 (据 Dahlberg, 1992)



来,而是沿着界面向右下方滚落;A、C、D等处虽然重力势不是系统中最低的,若小球没有从左上方滚落时的惯性力,小球在这些地方都将停止下来,因为这些地方都是重力势场的极小点。将此图从右至左看,就是油气运移的情况,小球可看作是油气,波状起伏的界面之下充满了水,油气的运移特征与小球在重力作用下的滚动完全一致。

更重要的是,由于油气运移仅沿着某些范围十分局限的通道发生,油气运移的动力学分析必须摆脱原来通道宏观均匀的假设。油气沿非均质通道运移的过程中,运移路径周围可能的突破点处毛细管力的方向和大小都不一样(Tokunaga *et al.*, 2000; Luo *et al.*, 2004),突破的位置则取决于运移路径的形状、其他运移动力、各可能突破点毛细管力间的相对大小等。因此,在油气势中加入毛细管力项给实际应用带来了诸多不便。

此外,即便油气势分析中包括了毛细管力,仍不能将储集层中的压力与异常高压盖层中的压力统一在一起。盖层之所以能够产生并保持异常高压,表明在地质时间尺度上盖层的渗透率也非常小(Luo and Vasseur, 1997),在油气运移发生的时期,盖层与储集层间流体流动所对应的水动力较浮力、毛细管力等油气运移动(阻)力大得多,难以统一考虑。

因而,在实际应用时,应将 England 等(1987)提出的流体势公式中的毛细管力项去掉,即油势 Φ_o 和气势 Φ_g 为(罗晓容, 2008)

$$\Phi_o = \Phi_w + (\rho_w - \rho_o)gz \quad (1.12)$$

$$\Phi_g = \Phi_w + (\rho_w - \bar{\rho}_g)gz \quad (1.13)$$

这样,油气势的含义就是在全部油气运移动力的合力的作用下,将单位体积的油气从基准面搬移到观察点所需做的功。其对应的运移动力方向、大小与运移通道的物性特征无关,而只是取决于油气势梯度降低的法线方向与梯度大小。油气势场给出了运移动力的指向和大小,油气具有从高势区向低势区流动的趋势。

这样,油气在输导层或储层内的运移方向,油气在圈闭内的聚集范围和位置,盖层及断层、不整合面等遮挡面封堵油气的效率等,均取决于运移动力和阻力之间的平衡关系。运移过程中,油气运移路径的形成及油气在其中的运移取决于运移动力与毛细管力间的关系,如果前者大于后者,则油气运移,否则油气滞留不动。这样,油气运移、聚集和散失的动力关系都可以在流体势的概念下统一起来。

1.1.3 油气运移通道

通道是油气从“源”到“藏”的桥梁和纽带,烃源岩生成的油气只有经过有效通道才能进入圈闭聚集成藏,其在主要运移时期的输导能力与连通性特征直接影响着油气运移方向和聚集部位。因而通道是油气成藏动力学研究的重要基础。在碎屑岩含油气盆地内,运移通道主要由砂岩输导层、断层或裂缝及不整合面构成。自20世纪90年代以来,国内外学者针对油气运移通道做了大量的研究工作,取得了很多重要成果,同时仍存在一些问題亟待解决。对于运移动力学研究而言,通道研究的重点在于不同类型运移通道的空间结构、输导能力及时间演化等的合理重建与描述。

1. 砂岩输导体

砂岩体是碎屑岩盆地广泛存在的一种重要通道类型。渗透能力强且连通性较好的砂岩体及其集合构成了砂岩输导体。它们彼此连通可能是由于砂岩体之间直接接触，或者由断层、裂隙带等构成了砂岩体之间的流体流动通道（罗晓容等，2012）。

输导体与储集体都是具有一定孔隙空间并具有渗透能力的岩体，但输导体还具有与其他输导体之间的流体连通性关系，能够在油气源与圈闭之间构成有效的运移通道（罗晓容等，2012）。对于输导体连通性的要求使得其研究远比储集体更为困难，因为这种连通性关系在不同的尺度上都必须考虑，首先要考虑的就是砂岩输电体的层次性和非均质性。

在实际地质条件下，受到宏观上和微观上沉积、成岩和构造等各种因素的影响，砂岩体具有强非均质性的特征，从千米级直到微米级尺度上观察（图 1.2），砂岩体在沉积相带、地层沉积结构和岩石结构等方面都表现出非均质性（Weber，1986）。

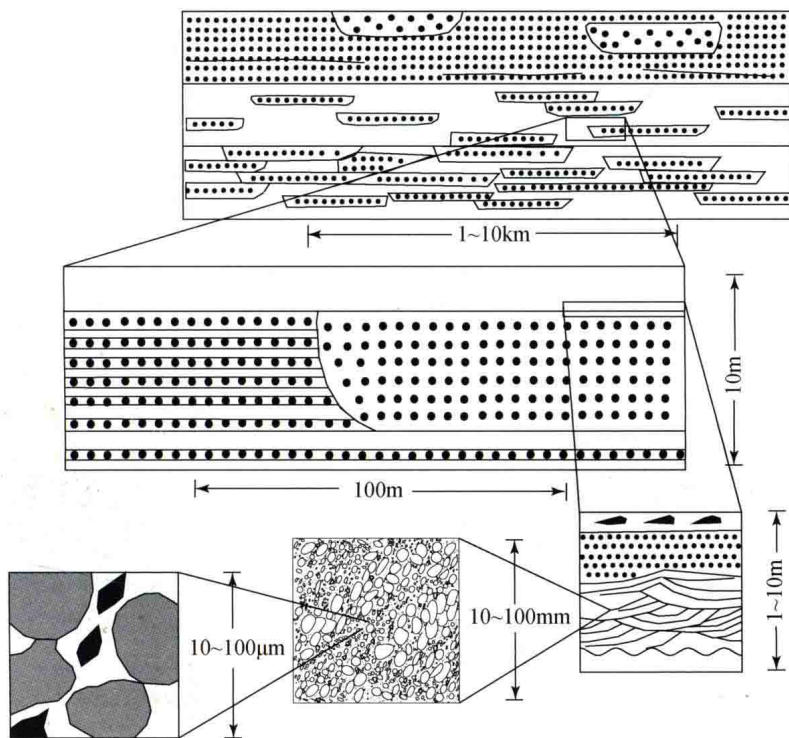


图 1.2 河流相储集层内不同尺度上所观察到的非均质性（据 Weber，1986）

在微观层次上，碎屑颗粒的矿物组成、粒径大小、分选磨圆性和堆积方式以及成岩程度、胶结物含量和类型等都是不均一的，这些不均匀性可以表现为输导层孔隙度和渗透率的非均质性（Dreyer *et al.*，1990；Doyle and Sweet，1995）。输导层在宏观尺度上的非均质性主要是由于沉积相的空间变化、沉积构造和沉积物质差异造成的（Chandler *et al.*，1989；Goggin *et al.*，1992；Liu *et al.*，1996）。不同的沉积相带对应不同的物源、物质组成、成岩环境及构造背景，因而表现为粒径大小、分选性、矿物组成及胶结物含量、类型等方面的差异。沉积构造是造成输导层非均质性的重要因素，如 Liu 等（1996）对悉尼盆



地内 Awkesbury 分流河道砂体的研究表明,具低角度交错层理的分流河道砂体的渗透率最大,大规模交错层理及块状砂体渗透率中等,而小规模交错层理的砂体渗透率最小。在构造裂隙发育的地区,由于裂隙的连通作用,将会对输导层的局部孔渗特征产生较大影响,使其连通性显著增加(解习农等,1997)

砂岩体孔渗物性在埋藏过程中因成岩作用改造而不断变化,总体上具有孔隙度、渗透率随埋藏深度增加而降低的趋势(Ehrenberg and Nadeau, 2005),但在同一深度的砂岩中孔渗(孔隙度、渗透率)物性变化往往极大(图 1.3)。事实上,除压实作用和压溶作用可以正向地降低孔渗性,其他的成岩作用受到的影响因素太多,对砂岩孔渗物性改变的机理、过程及其对孔渗空间分布的作用也难以确定(Maxwell, 1964; Surdam *et al.*, 1984; 刘宝珺、张锦泉,1992; Bloch *et al.*, 2002; 寿建峰等,2006)。砂岩中的成岩过程往往具有非均质性,并改变着地层中流体流动的特征(Dutton *et al.*, 2002),但成岩作用及其与流体流动间的关系并没有得到系统研究(Fitch *et al.*, 2015)。近年来的研究发现,实际上成岩作用受到沉积结构非均质性的影响,在沉积地层深埋过程中具有差异性特征,在一定尺度的单元内部,成岩作用相对简单,若能够进一步将其成岩过程以某种方法划分出不同时间阶段,则成岩作用过程便可能清楚地表述出来(Luo *et al.*, 2015)。不同单元间成岩作用过程的差异加剧了储层的非均质性,使得流体活动与成岩过程更加复杂,其最终结果更加突显了非均质性的结构性特征(罗晓容等,2016a, 2016b)。

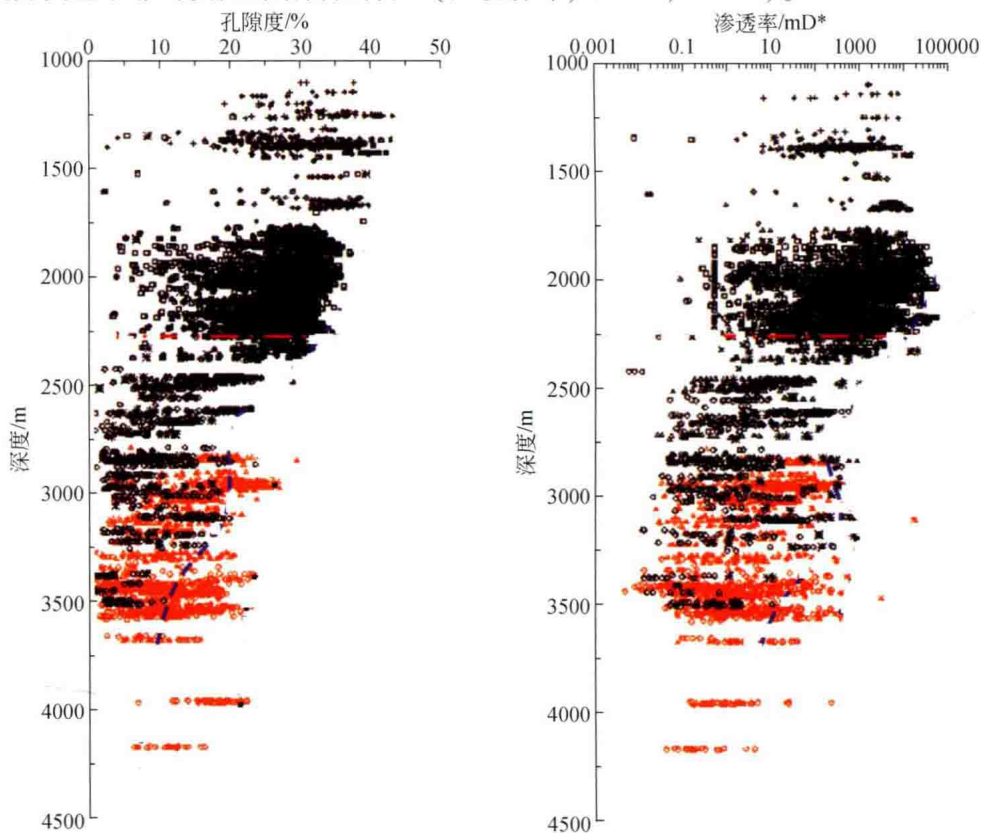


图 1.3 渤海湾盆地胜坨地区沙河街组储层物性随深度变化图

注: $* 1 \text{ mD} = 1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$