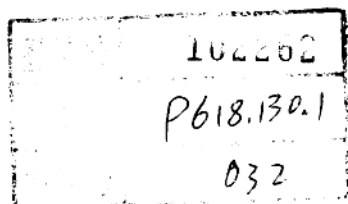


断陷盆地油气 二次运移与聚集

查明 著

地质出版社

京)
0.]



断陷盆地油气二次运移与聚集

查明 著

5715/15



地质出版社

· 北 京 ·

内 容 简 介

本书系统地介绍了油气二次运移、聚集的理论、研究方法及应用。著者以石油地质学、有机地球化学、构造地质学和流体动力学理论为指导,以数值方法和计算机技术为手段,定性地质分析与定量数值模拟相结合,研究了渤海湾盆地东营凹陷下第三系石油二次运移的特征和规律。书中重点分析了盆地地下流体动力学特征、运移地球化学、盆地类型与构造活动对油气运移、聚集过程的作用;根据盆地模式、运载层分布及烃源岩排烃规律,建立了压实流盆地石油运移动力学理论模型;通过对地质条件和参数的分析,重点对古水动力场、石油势、运移速度、运移动力学条件的历史演化、分布规律及主要控制因素等进行了数值模拟和分析。研究结果在解释东营凹陷油气运移方向、有利聚集地区、主要成油期和油气分布规律等方面具有理论和实际参考价值。

本书可供从事油气地质勘探、盆地分析、油气资源评价及盆地数值模拟方法与软件研究的专业工作人员、大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

断陷盆地油气二次运移与聚集/查明著. -北京:地质出版社, 1997.8

ISBN 7-116-02400-X

I. 断… II. 查… III. ①油气运移: 二次运移-断陷盆地-研究②油气聚集-断陷盆地-研究
IV. P618.130.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 12487 号

地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路 29 号)

责任编辑:舒志清 张 顺

责任校对:关风云

*

北京印刷学院实习工厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本: $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ 印张: 8.625 字数: 207000

1997 年 8 月北京第一版·1997 年 8 月北京第一次印刷

印数: 1—600 册 定价: 18.20 元

ISBN 7-116-02400-X

P·1792

序

油气运移与聚集是石油地质领域重要的研究难题之一。对我国中、新生代断陷盆地,从理论到实践进行系统的油气二次运移与聚集研究,不仅具有重要的理论意义,而且对油气勘探具有积极的指导作用。

本书的作者以石油地质学为核心,以构造地质学、有机地球化学和流体动力学为指导,以计算机技术为手段,对东营凹陷油气二次运移特征、运移动力学条件和油气聚集与分布规律进行了深入的研究。作者从水文地质条件和盆地流体动力学环境分析入手,论证了东营凹陷下第三系(沙三段)为一典型的年轻压实流盆地;运用流体势理论和方法剖析了区域流体势场与油气运移、聚集的对应关系;应用地球化学方法进一步证实了区域流体势场的性质,从理论上阐明了该区油气呈环带状分布的基本规律。作者还从盆地的构造背景出发,详细分析了构造和断裂活动在油气运移、聚集中的作用,并提出了东营凹陷油气运聚的模式。在扎实的地质综合分析基础上,建立了压实流盆地油气运移地质概念模型和数学模型,并实现了二次运移历史与过程的数值模拟。

纵观全书,反映作者在油气运移与聚集的理论与实践方面做了出色的工作,有许多观点和认识具有新意,所提出的研究思路和方法不仅为我国断陷盆地油气运移与聚集研究提供了范例,而且对“九五”油气成藏定量模式研究具有参考价值。

油气运移与聚集研究涉及的时-空范围广,控制因素复杂,要解决其中的某些问题需要具备多学科的理论知识和行之有效的方法。作者涉足这一研究难度较大的课题,并进行了有益的探索,反映作者具有较好的科学研究素质和能力。这对于一个年轻的石油地质工作者来说,的确难能可贵,我们为此深感欣慰。

查明同志 1982 年毕业于石油大学,同年留校任教;1995 年以优异成绩毕业于中国地质大学能源系,并获博士学位。10 余年来,他一直从事于盆地定量分析与油气地质勘探方面的教学与研究工作,取得了可喜的成绩。本书是他近年来的主要研究成果之一。我们作为他的导师,向读者推荐此书,希望在油气运移与聚集研究方面对读者有所启发或参考;同时,也期望作者在此方面做更深入的研究,今后有更多、更好的成果问世。

陈发景
师一伟

1997 年 4 月

前 言

油气二次运移、聚集是油气藏形成历史中的一个关键过程，也是目前石油地质学发展中所关注的重要内容。与油气的生成和排烃过程相比，二次运移、聚集过程中所涉及的时-空范围更广，条件和影响因素更为复杂。这不仅在理论认识上增加了难度，而且在研究思路和方法上受到了限制。然而，运移、聚集又是油气资源评价和盆地勘探目标选择中不可避免的实际问题。因此，从理论上探讨和分析运移、聚集的机理和条件，从实际出发研究油气运移的历史和规律，具有重要的理论意义和实际指导意义。

近几年来，国内外在油气二次运移的理论和研究方法研究方面已取得了较大的进展，其发展趋势是多学科理论和方法的渗透与综合，并逐步从定性描述发展为定量分析、模拟。本书正是以这些理论和方法研究的新成果为基础，结合我国东部中、新生代典型断陷含油气盆地——东营凹陷的特点，在油气二次运移理论与方法研究方面进行了探讨，并形成了自己的研究思路，突出了以定性研究为基础，定量分析与模拟为目标，二者有机结合的基本特色。

全书共分七章：

第一章：主要以国内外近几年的研究成果为基础，比较系统地介绍了油气二次运移、聚集的基本理论、模式和方法。通过国内外典型研究成果的概述，强调了运移机理研究在油气二次运移、聚集研究中的重要作用；描述了油气二次运移的相态、临界条件和动力学特征；二次运移和聚集的机理模式则是在大量理论与实验研究成果基础上形成的综合认识，对理解运移过程和解决实际运移问题具有重要的指导意义。二次运移的研究方法包括模拟实验、流体势分析、运移地球化学和计算机模拟，其中模拟实验又是认识运移机理的基础和实现数值模拟的前提。这部分成果是形成本书研究思路必不可少的理论基础。

第二章：主要介绍了研究区的构造与地质背景、区域地层、沉积相类型与分布特征；重点阐述了东营凹陷的石油地质条件，如主要生烃层系、成油期、生储盖层的配置关系以及油气藏类型与分布规律等。从本章的内容可以了解东营凹陷基本地质概貌和主要特征。

第三章：以建立油气二次运移的基本模型——盆地模型为目的阐述了地下流体动力学特征。通过大量测试资料的统计，将新生代划分为三大水文地质旋回，分析了东营凹陷沙河街组地层水型和矿化度的分布及其与油气分布的关系、油气性质的变化规律及影响因素，重点研究了沙三段和沙四段地层压力的平面和剖面分布规律、异常压力特征以及压力在油气运移中的作用。通过流体势理论与方法的介绍，分析了沙三段的区域流体势场性质和特征，表明凹陷具有压实流盆地典型的“离心式”流体势场特征以及该势场与油气运移、分布的关系，不但从理论上阐明了油气呈环（带）状分布的基本规律，而且为建立运移概念模型和实现数值模拟奠定了方法基础。

第四章：运用有机地球化学方法进一步阐明压实流盆地的“离心流”场性质和追踪地质历史时期油气运移的方向、距离和规律。在油源对比、分析的基础上，运用“地质色层”原理分析了生物标志化合物、碳同位素、 C_{25} 正构烷烃和原油物性等指标的变化规律。这些指

标均较好地指示了本区油气呈“离心式”运移的基本格局。最后还讨论了有机地球化学方法在研究油气二次运移历史轨迹与油气分布关系中的作用及其石油地质学意义。

第五章：从盆地的构造背景出发，比较详细地讨论了盆地类型、构造活动、断层以及水动力环境等因素对油气运移、聚集过程的控制作用。首先，以国内外关于盆地类型与油气运移方式的典型模式为指导，指出东营凹陷为一典型的大陆裂陷盆地，并具有压实流盆地的典型特征；其次，详细讨论了断层在油气运移中的作用问题，结合断层活动时期与油气运移关系的理论认识，分析了东营凹陷断层活动的基本特点及其对油气垂向运移、聚集的控制作用；最后，以压实流盆地水动力环境与动力学特征为依据，阐明了区域水动力场对油气侧向运移具有长期而重要的影响，并提出了东营凹陷油气运移的模式。

第六章：主要介绍了石油运移动力学理论模型的建立。首先强调了概念模型的含义和作用；随后在盆地模型（第三、第五章）的基础上，根据沙三段运载层在平面和剖面上的分布规律、运载层内水动力学特征和沙三段烃源岩有效排烃模式，建立了沙三段运载层分布的地质概念模型和古水动力学概念模型；最后以流体动力学理论和流体势分析方法为指导，建立了压实流盆地“准三维非稳定流动”古水动力学数学模型和石油运移速度数学模型，并采用均衡-结点叠加网格系统和有限差分方法实现了古水动力学方程的数值求解。

第七章：根据东营凹陷的实际条件，对模拟所需要的地质参数、运载层参数和流体参数等进行了详细的分析与确定，重点分析了古水动力场、石油势、运移速度、运移动力学条件等主要模拟结果的历史演化、分布规律及其主要控制因素；强调了研究结果对于解释东营凹陷油气运移方向、有利聚集地区、主要成藏期和油气在平面上分布规律的作用和对实际勘探的指导意义。

在本书的撰写过程中，始终得到了恩师陈发景教授和张一伟教授的精心指导和支持，王捷教授级高工也给作者以有益的启发和指导。郝石生教授和李明诚教授对本书初稿进行了认真的审阅。刘光鼎院士、杨起院士、王德发教授和金之钧教授给予了热情指导和鼓励。熊琦华教授、张厚福教授、张万选教授、赵澄林教授、朱筱敏教授和胡见义教授级高工等曾评阅了本书的主要内容。韩玉茱高工、张建世高工、邱郑泽高工、陈建平高工、陈喜禄高工、王世虎高工、张卫海讲师、康永尚博士、于兴河博士、周承诗和曲江秀等同志均给予了热情帮助。作者的夫人汤女士对课题研究、本书的撰写和出版始终给予了全身心的支持。作者在此对他们表示诚挚的谢意。

热忱地欢迎读者就书中的内容和观点等方面提出宝贵的意见，或同作者进行有益的讨论和交流。

作 者

1997年1月

目 录

序

前 言

第一章 绪论	1
第一节 油气二次运移、聚集的基本理论	1
一、油气二次运移的机理	1
二、油气二次运移的机理模式	6
三、油气聚集的机理模式	7
第二节 油气二次运移和聚集的研究方法	9
一、油气运聚模拟实验	9
二、水动力学与流体势分析	12
三、有机地球化学方法(地质色层效应)	15
四、计算机数值模拟	15
第三节 研究内容与技术方法	17
一、研究区选择	17
二、主要研究内容	17
三、技术思路与方法	17
第二章 区域地质概况	19
第一节 区域构造背景	19
第二节 区域地层概述	20
第三节 沉积相分布特征	22
第四节 石油地质条件	25
一、生油条件	25
二、成油期	25
三、生、储、盖层的配置关系	25
四、油气藏类型与分布规律	26
第三章 盆地流体动力学特征	27
第一节 水文地质条件	27
一、水文地质旋回	27
二、地层水的化学性质	28
三、水化学性质的演变	32
四、水文地质条件与油气分布	35
第二节 流体性质	36
一、相对密度	36
二、动力学粘度	38
第三节 区域压力分布	38

一、压力的纵向分布	38
二、压力的平面分布	41
第四节 区域流体势分析	42
一、基本理论与方法	42
二、东营凹陷流体势分布特征	45
第四章 石油运移地球化学	48
第一节 油源对比	48
一、对比指标	48
二、对比结果	49
第二节 地质色层效应与油气运移	60
一、基本原理	60
二、典型指标的分布与变化特征	63
第三节 石油运移规律及意义	69
第五章 盆地构造背景与油气运移方式	70
第一节 盆地类型与运移方式的典型模式	70
一、运移方式(侧向流动和垂向流动)	70
二、A. Perrodon 运移模式	71
三、陈发景运移模式	72
第二节 东营凹陷的典型特征	74
第三节 断层和构造活动与运移方式	74
一、断层在油气运移中的作用问题	75
二、断层的活动时期	75
第四节 水动力环境与运移方式	78
一、水动力演化阶段	78
二、水动力环境与运移模式	78
第六章 石油运移动力学模型	80
第一节 概述	80
一、概念模型的含义及作用	80
二、运载层特征	80
第二节 概念模型	84
一、运载层概念模型	84
二、古水动力学概念模型	85
第三节 数学模型	85
一、基本方程	86
二、水动力学方程	87
三、运移速度方程	88
四、水动力学方程的定解条件	88
第四节 数值方法	89
一、网格系统	89
二、有限差分方程	89
三、解古水动力方程的过程	92

第七章 石油二次运移数值模拟	93
第一节 模拟参数分析与确定	93
一、基本地质参数	93
二、运载层参数	94
三、流体参数	101
四、系统参数	103
第二节 模拟结果分析	104
一、古水动力场的分布与演化	104
二、影响古水动力场的主要因素	106
三、油势的分布与演化	108
四、运移速度分析	111
五、运移动力学条件	116
第三节 模拟结果的实际意义	116
结语	117
参考文献	119
英文摘要	124

CONTENTS

Preface

Foreword

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Theories of Secondary Hydrocarbon Migration and Accumulation	1
1.1.1 Mechanisms of secondary hydrocarbon migration	1
1.1.2 Mechanism models of secondary hydrocarbon migration	6
1.1.3 Mechanism models of hydrocarbon accumulation	7
1.2 Studying Methods of Secondary Hydrocarbon Migration and Accumulation	9
1.2.1 Modelling experiments of migration and accumulation	9
1.2.2 Hydrodynamic and fluid potential analysis	12
1.2.3 Organic geochemistry (geochromatography)	15
1.2.4 Computer numerical simulation	15
1.3 Contents and Methods	17
1.3.1 Target area	17
1.3.2 Studied contents	17
1.3.3 Techniques and methods	17
Chapter 2 Summary Of Regional Geology	19
2.1 Tectonic Settings	19
2.2 Summary of Strata	20
2.3 Distribution of Sedimentary Facies	22
2.4 Conditions of Petroleum Geology	25
2.4.1 Hydrocarbons generation	25
2.4.2 Generating-petroleum periods	25
2.4.3 Allocations of source, reservoir and seal rocks	25
2.4.4 Types and distributions of oil & gas pools	26
Chapter 3 Characteristics Of Hydrodynamics In Dongying Depression	27
3.1 Hydrological Condition	27
3.1.1 Hydrological cycles	27
3.1.2 Chemical properties of formation water	28
3.1.3 Evolution of water chemical properties	32
3.1.4 Relation between hydrological condition and hydrocarbon distribution	35
3.2 Fluid Properties	36
3.2.1 Relative density	36
3.2.2 Dynamic viscosity	38
3.3 Regional Pressure Distribution	38

3.3.1	Vertical pressure distribution	38
3.3.2	Lateral pressure distribution	41
3.4	Fluid Potential Analysis	42
3.4.1	Theory and methods	42
3.4.2	Distribution of fluid potential of Dongying Depression	45
Chapter 4	Geochemistry Of Petroleum Migration	48
4.1	Oil Source Correction	48
4.1.1	Correction indicators	48
4.1.2	Correction results	49
4.2	Geochromatography and Migration	60
4.2.1	Principle	60
4.2.2	Change and distribution of typical indicators	63
4.3	Regularity and Significance of Petroleum Migration	69
Chapter 5	Basin Tectonic Setting And Migration Styles	70
5.1	Typical Models of Basin Type and Migration Style	70
5.1.1	Migration styles (lateral and vertical flows)	70
5.1.2	A. Perrodon's model	71
5.1.3	F. J. Chen's model	72
5.2	Typical Geological Characteristics of Dongying Depression	74
5.3	Faults, Tectonic Activity and Petroleum Migration	74
5.3.1	Fault roles in petroleum migration	75
5.3.2	Activity periods of faults	75
5.4	Hydrodynamic Environment and Migration Patterns	78
5.4.1	Evolutional stages of hydrodynamics	78
5.4.2	Hydrodynamic environment and migration models	78
Chapter 6	Dynamic Models Of Petroleum Migration	80
6.1	Introduction	80
6.1.1	Meanings and functions of conceptual model	80
6.1.2	Characteristics of carrier beds	80
6.2	Conceptual Models	84
6.2.1	Conceptual model of carrier beds	84
6.2.2	Conceptual model of paleohydrodynamics	85
6.3	Mathematical Models	85
6.3.1	Basic equations	86
6.3.2	Hydrodynamic equations	87
6.3.3	Migration velocity equations	88
6.3.4	Solving conditions of hydrodynamic equations	88
6.4	Numerical Methods	89
6.4.1	Net divisions for simulation	89
6.4.2	Limited differential equations	89
6.4.3	Process for solving hydrodynamic equations	92

Chapter 7 Numerical Simulation Of Secondary Hydrocarbon Migration	93
7.1 Analysis and Determination of Simulating Parameters	93
7.1.1 Basic geological parameters	93
7.1.2 Carrier bed parameters	94
7.1.3 Fluid parameters	101
7.1.4 Constants in simulation	103
7.2 Analysis of Simulating Results	104
7.2.1 Distribution and evolution of paleohydrodynamic field	104
7.2.2 Main factors of effect paleohydrodynamic field	106
7.2.3 Distribution and evolution of petroleum potential	108
7.2.4 Analysis of Migration velocity	111
7.2.5 Dynamic conditions of migration	116
7.3 Practical Significance of Simulating Results	116
Conclusions	117
References	119
Abstract	124

第一章 绪 论

沉积盆地中油气的分布是油气生成、排驱、运移、聚集和保存的最终结果。长期以来，人们对烃类的生成、排驱的机理和条件已取得了较为系统的认识和卓有成效的成果，并不同程度地指导着油气勘探。尤其是 80 年代以来，对烃类生成、运移和资源量评价也从定性描述和推断逐步发展到定量分析和数值模拟。这标志着油气勘探的理论和方法已进入新的发展阶段。

尽管早期的一些研究已能定量地分析盆地演化、生烃及部分排烃问题，然而仍未能有效地解决油气勘探中的核心问题，即油气是如何运移并聚集到现今的圈闭中的？油气在盆地中的分布受哪些因素控制？因此，油气二次运移和聚集过程的研究不仅对石油地质学的发展有重要的理论意义，而且对油气勘探有积极的指导作用。

第一节 油气二次运移、聚集的基本理论

油气二次运移是指油气自生油、气层排出，并进入运载层之后发生的一切运移。它既包括油气在储层（运载层）内的运移，也包括沿断层、微裂缝、不整合面等通道的运移（图 1-1）。

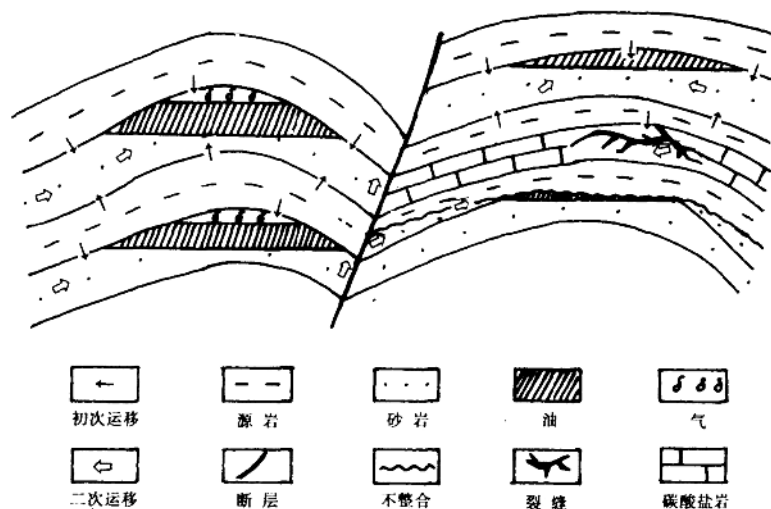


图 1-1 油气二次运移、聚集示意图

一、油气二次运移的机理

运移机理是油气二次运移、聚集研究中的核心问题之一，涉及到油和气的运移相态，临

界条件, 动力学特征, 储集空间的微观性质和油、气、水间的相互驱替机制等。

(一) 油气运移相态

与初次运移相似, 运移相态也是二次运移研究中的难题之一。从石油地质作用的机理来看, 初次运移与二次运移是难以完全分开的两个阶段, 它们既有区别又有联系。一方面, 二次运移是初次运移的继续, 二次运移开始阶段的相态势必然受到初次运移相态的影响; 另一方面, 二次运移所发生的环境与生油、气层环境有较大的不同, 故油气在运载层等介质中运移时所呈现的相态又与初次运移有明显的区别。因此, 对初次运移相态研究所取得的认识是进行二次运移相态研究的基础。

根据目前的研究, 认为油和气初次运移的相态主要有水相和烃相。但因油和气的性质不同, 它们所表现的相态也有差别。目前对初次运移相态的认识主要有:

① 烃溶于水 (G. I. Admas, 1903; M. J. Munn, 1909; A. W. McCoy, 1918; L. C. Price, 1976 等);

② 烃呈胶束状 (E. G. Baker, 1959, 1967; R. J. Cordell, 1973 等);

③ 烃呈游离相 (P. A. Dickey, 1975; K. Magara, 1978; D. H. Welte 等, 1981);

④ 扩散相 (Sokolov, 1956; Hinch, 1978; D. Leythaeuser, 1980, 1982; B. Krooss 等, 1987, 1988, 1992; 郝石生等, 1991; 李明诚, 1994 等);

⑤ 干酪根三维网络运移 (C. D. McAuliffe, 1978, 1979);

⑥ 油溶相或气溶相 (郝石生, 1993; Sokolov, 1963; Tissot, 1987);

⑦ 高温、高压环境下油气呈混溶相 (张义纲, 1994), 等等。

然而, 影响油气运移相态的因素是复杂的, 在不同的地史阶段也可能呈现出不同的相态, 尤其是天然气初次运移相态的多样化; 但在某一特定条件下可能以某一种相态为主。油和天然气, 由于它们溶解性的差异, 可导致运移相态的很大不同。石油在不同的温度和压力下, 其溶于水的能力有所不同, 但与天然气相比, 油在水中的溶解度要比气小得多 (J. M. Hunt, 1986), 即随温度升高而增大, 并随水的盐度增大而减小。压力的升高对液态烃在水中的溶解度的减小也有一定影响。在生油窗范围内 (如 $60 \sim 110^{\circ}\text{C}$), 石油的溶解度不超过 100×10^{-6} 。如果以水溶相运移, 石油的溶解度至少也要达到 8000×10^{-6} , 实际上这在 200°C 以上也是难以达到的。因此, 对于液态烃来说, 在油气的主要生成深度范围内 ($1500 \sim 4500\text{m}$), 以独立烃相运移可能是主要的方式; 在此范围以上, 液态烃 (油) 可能有水溶液相运移, 部分也可能以胶束溶液方式运移 (李明诚, 1987); 在深度较大、压力较高时 (如异常高压带), 则可能以混合相运移方式为主。

常压下, 天然气在水中的溶解度要比石油大 100 倍, 在地下温压条件下则更大。这说明水溶相是天然气运移的一种重要方式, 而且水溶相运移还可避免亲水介质中的毛细管阻力, 是最方便的运移方式。据 Sokolov (1956) 研究, 常温、常压下, 甲烷在油中的溶解度比在水中大 9 倍, 乙烷则比在水中大 $25 \sim 45$ 倍, 丙烷比在水中大近 1000 倍, 并随压力增加而增大。可见, 当源岩中有油存在时, 气将优先于溶于其中, 并以油为载体运移 (李明诚, 1994)。

由于天然气的特性, 在初次运移中可表现出比油更丰富的运移方式, 因而在各演化阶段, 也有以一种相态为主的运移特征。李明诚 (1992) 认为, 油型气和煤型气在不同的成熟阶段, 可呈现不同的运移相态 (图 1-2)。郝石生等 (1993) 研究了天然气在水中的溶解度及天然气的运移相态, 表明天然气在初次运移过程中, 以水溶气、油溶气、游离气运移的比例

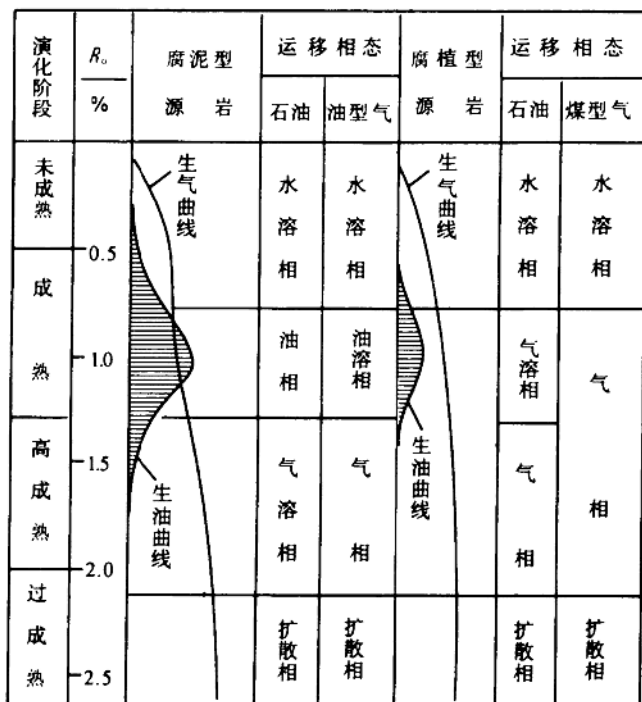


图 1-2 石油与天然气运移相态纵向演变示意图

(据李明诚, 1992, 略改)

为 1:0.40:0.91; 在未成熟阶段, 水溶气与游离气的比例为 1:0.19; 在成熟阶段, 水溶气、游离气、油溶气的比例为 1:2.42:1.23 (图 1-3)。

很多研究都表明, 油以独立相态发生初次运移时, 必须达到 10% ~ 30% 的饱和度才能

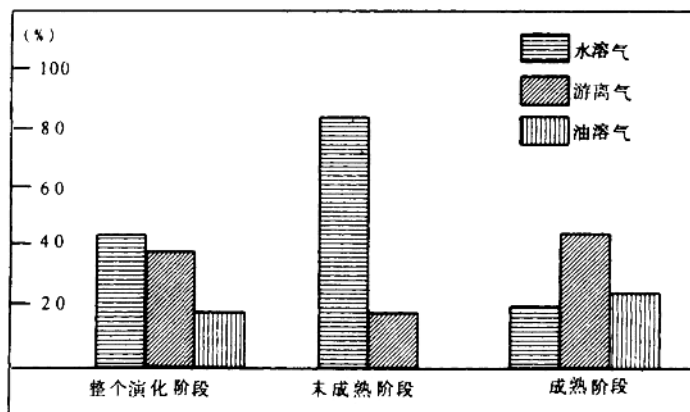


图 1-3 廊固凹陷下第三系天然气初次运移相态分布图

(据郝石生等, 1993, 略改)

发生流动,而天然气的临界运移饱和度要达到5%~10%左右。尽管气-水界面张力比油-水大,毛细管阻力也大,但游离气无需进行相态转化就能直接运移、成藏。因此,天然气以游离气体方式进行运移仍是最重要的方式之一。

总之,从现有的证据来看,液态烃呈独立相态运移的可能性更大,而气态烃以水溶相和游离气相运移的可能是主要的,扩散相则是天然气独有的运移相态;在高温、高压条件下(如“封存箱”环境),油和气还可呈混溶相运移。目前,大多数人的认识,在原则上基本是一致的。

油气二次运移的最终结果是油气的聚集,这意味着油气在二次运移的主要阶段上是以独立相态运移为主。目前的一些研究结果也表明,天然气在二次运移过程中仍以游离相为主,如郝石生等(1993)研究冀中地区坝县凹陷下第三系天然气二次运移相态时发现,沙三段天然气以水溶相、游离相、油溶气相二次运移的比例为1:7.02:2.17,沙四段为1:12.05:1.49。这些数值比成熟阶段初次运移时游离气的比例还要高2.9~5倍。这清楚地表明,水溶性比油高得多的天然气在二次运移中以游离气相占绝对优势,由此不难解释油在二次运移中以独立油相运移的特性。

(二) 油气二次运移的临界条件

初次进入运载层的烃并非能立刻呈连续相,也并非有足够的浮力即刻向上运移,而是在聚集到一定浓度和烃柱高度或长度时,才能在浮力或水动力作用下逐渐上升,并向运载层的顶部集中;随后在运移动力作用下沿运载层继续作侧向或垂向流动。因此,要使油气继续运移,必须具备一定的初始烃饱和度和烃柱高度。

1. 临界油气饱和度

烃类以连续相发生二次运移时,要求有一定的烃饱和度。C. D. McAuliffe (1979)认为,如果从运载层到圈闭的通道上油气残余饱和度低于20%~30%,独立油相二次运移就会受到限制,甚至不可能发生。当沿着运载层的上部或下界面含油饱和度达到20%~30%时,独立相态的烃才能在浮力作用下发生二次运移。T. T. Schowalter (1979), L. Catalan 等(1992), Selle 等(1993), M. M. Thomas 和 J. A. Clouse (1994)通过模拟实验证实,油相二次运移需要的最低饱和度分别为10%、10%~30%、10.4%~10.6%和5%~15%;而P. Ungerer 等(1990)等则认为,油饱和度在0.5%~4%就可发生二次运移;W. A. England (1987)等也提出运载层中至少要达到20%~30%的含油饱和度才能形成连通的运移通道。这部分油饱和度主要是以残余油的形式沿运移通道损失了。根据在运移路径上的钻井资料,有时可以发现储层中都有残余油。总的看来,油相发生二次运移的临界饱和度为10%~30%,这对大多数运载层是合适的。

对天然气二次运移也有相似的认识,因气与油物理性质的差异,其运移临界饱和度也不同。Hevorson (1967)用双相渗滤实验证实,非润湿相的气饱和度要达到5%~10%时才能产生气相运移;T. T. Schowalter (1979)也认为,5%~10%的气饱和度足以产生“亮点”异常,说明这些气还没有形成连通的气焰,故气临界饱和度应达到10%以上;郝石生(1994)认为,以10%作为气开始运移的饱和度适用于大多数储集岩。

2. 临界油柱高度和长度

(1) 静水条件

在静水条件下,油气一旦进入运载层,浮力便成为主要驱动力。油体受到的净浮力 F_w 。

与油、水的密度差有关:

$$F_w = zg(\rho_w - \rho_o) \quad (1-1)$$

在油刚进入储层时, 岩石孔隙是被水润湿的, 油所受到的毛细管力为:

$$P_c = 2\sigma\left(\frac{1}{r_t} - \frac{1}{r_p}\right) \quad (1-2)$$

因此, 油必须克服运载层孔隙的毛细管力才能向上浮动, 即油体本身与毛细管力要达到一定的压差, 即:

$$zg(\rho_w - \rho_o) > 2\sigma\left(\frac{1}{r_t} - \frac{1}{r_p}\right) \quad (1-3)$$

式中: z ——油体的高度 (cm 或 m);

ρ_w ——水密度 (g/cm^3);

ρ_o ——石油密度 (g/cm^3);

σ ——油-水界面张力 ($10^{-5}\text{N}/\text{cm}$);

r_t ——孔隙半径 (cm);

r_p ——油体半径 (cm);

g ——重力加速度 ($980\text{cm}/\text{s}^2$)。

当浮力和毛细管力达到平衡时, 此时油体的高度称为二次运移的临界油柱高度 z_c :

$$z_c = \frac{2\sigma\left(\frac{1}{r_t} - \frac{1}{r_o}\right)}{g(\rho_w - \rho_o)} \quad (1-4)$$

若 $\sigma = 35 \times 10^{-5}\text{N}/\text{cm}$, 油水密度差为 $0.1\text{g}/\text{cm}^3$, 油在细砂岩 (颗粒直径约为 0.2mm) 中运移时, 则油串向上运移所需要的最小高度约为 3m , 而在中—粗粒砂岩中运移需要的油串高度仅为 0.35cm 。对于气体, 当气、水密度差为 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ (地下条件) 时, 需要的气柱高度约为 0.3m 。可以看出, 在相同的条件下气体的运移比油要容易; 相反, 气体在储层中的保存要比油要难。

在静水条件下, 当连续的烃相达到上浮的临界高度时便开始向运载层顶部运移, 并在盖层的封闭下, 油体沿顶界面分散, 当聚集到相当于油体的临界高度时才继续沿运载层的上倾方向运移。此时, 运移的临界值实际上是油体沿运载层顶界运移的临界长度 L_c :

$$L_c = \frac{P_c}{(\rho_w - \rho_o)g\sin\alpha} \quad (1-5)$$

式中, P_c 为运移前缘的毛细管压力, α 为运载层的倾角。 α 越大, 运移所需要的长度越小, 也即, 在相同条件下倾角大的部位石油易于运移, 这一结论已被 L. Catalan 等人的模拟实验所证实。

(2) 动水条件

实际上, 油气二次运移是在水动力、浮力和毛细管力同时作用下进行的, 运移的方向和聚集的部位将取决于这 3 种力的大小和方向。在动水条件下, 由于存在测势面梯度, 故要使连续的油体运移或聚集, 还要附加一个临界油柱高度 (R. R. Berg, 1975):

$$z' = \frac{\rho_w}{\rho_w - \rho_o} \frac{dh}{dx} x_o \quad (1-6)$$