

油气运移研究现状及主要进展

金之钧, 张发强

(中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:20世纪80年代以前,油气运移的研究主要集中在定性实验、机理认识和有机地球化学中油-源对比方面。之后,油气运移的研究呈多样化发展,主要包括:1)小尺度模型物理模拟-大尺度箱状模型-仿真模拟;2)油气运移流体动力学模拟-油气优势运移数值模拟;3)运移机理研究-系统论研究;4)油气运移流体示踪技术地球化学研究;5)网格模型-逾渗模型研究和应用;6)封存箱-幕式成藏理论与认识。未来油气运移学术领域的主要研究方向包括油气在输导层中运移的优势通道、逾渗模型在盆地尺度的发展和应用、断层启闭性评价方法、油气包裹体及自生矿物标志特征和采用动态、量化的动力学方法研究古流体运移问题的三场耦合。

关键词:物理模拟;数值模拟;机理;油气运移

中图分类号:TE112.1 **文献标识码:**A

Status and major advancements in study of hydrocarbon migration

Jin zhijun, Zhang Faqiang

(Exploration & production Research Institute, SINOPEC, Beijing)

Abstract: Prior to 1980s, study of hydrocarbon migration had been mainly concentrated in qualitative experiments, understanding of mechanism and geochemical oil-source correlation. Afterwards, it has been diversified mainly in the following 6 aspects: (1) physical simulation with small-scale model-large scale box-like model-realistic simulation; (2) fluid dynamic simulation of hydrocarbon migration-numerical simulation of predominant hydrocarbon migration; (3) study of migration mechanism-study of systems theory; (4) geochemical research of hydrocarbon migration with fluid tracing technologies; (5) study and application of grid model-invasion percolation model; (6) fluid compartment-episodic reservoiring theory. The future trends in study of hydrocarbon migration include: predominant pathways of hydrocarbon migration in carrier beds; building and application of basin-scale invasion percolation models; evaluation methods of opening and closing of faults; marker features of hydrocarbon inclusion and authigenic minerals; study three-field coupling of palaeo-fluid migration with dynamic and quantitative dynamic methods.

Key words: physical simulation; numerical simulation; mechanism; hydrocarbon migration,

油气与固体矿产不同,具有流动特性。这一特征决定了油气藏在时空分布与演化的复杂多变。这些复杂的动态过程都发生在地质历史时期^[1],在勘探开发中很难直接观察,甚至很难获得油气运、聚的痕迹^[2]。长期以来,油气运、聚、散过程的重要性一再为人们强调,但至今仍是油气地质理论研究和实际应用的薄弱环节^[3]。

关于石油运移的机理、运移路径的识别方法的

研究已经有80多年了^[2,4]。20世纪80年代以前,油气运移的研究主要归属于定性实验、机理认识和有机地球化学中油-源对比的范畴^[3]。20世纪80年代以后,油气运移的研究呈多样形式发展,除地球化学外,其理论、物理实验和数值模拟等方面都得到了很大的发展。近年来,很多学者从不同的角度对此进行过系统的综述和介绍^[2,3,5-7]。

本文从油气运移研究方法、油气运移理论研

基金项目:国家“973”重点基础研究发展规划项目(G1999043310)

第一作者简介:金之钧,男,48岁,教授(博士生导师),油气藏形成机理与分布规律研究、盆地分析与资源评价

收稿日期:2005-04-24

究及研究展望3个方面综述油气运移研究的现状和主要进展,总结研究了二次运移的理论发展体系,并绘制了技术理论发展谱系图。作者利用谱系图试图理清和描述油气运移相关理论的发展脉络,分析各理论方法分支之间继承和发展的历程。因篇幅所限,在此,不再一一列出对这一研究领域做出贡献的学者。

1 研究方法进展

1.1 物理模拟

物理模拟是油气二次运移理论发展的开端。早在1921年,王密尔斯就用各种粒度的砂岩岩样进行了石油运移实验^[8]。其后,陆续有学者进行了石油在背斜、向斜、断层等典型的构造中的运移实验^[9]。这些实验主要是集中对运移过程的观察和定性的描述。

20世纪50年代,Hubbert^[4]将浮力、烃动力和毛细管力作为运移的控制因素开展了相应的定量实验,最早提出了流体势的概念。20世纪60年代,开始注意到界面张力、润湿性、喉道半径等微观的实验参数对油气运移过程的控制作用^[10,11]。很多学者为研究油气微观运移状况及油气运移动力学机制进行着不懈的探索,所研制的油气微观运移模型主要包括珠粒充填模型^[12]、单孔模型、网络模型和岩石模型4种类型。其中,珠粒充填模型是在两个平板之间用等粒球进行三明治式单层紧密堆积,用以研究油在饱和水孔隙介质中的驱替过程。其后,Kimbler和Caudle等^[13]又进一步发展了此种模型^[12]。

在珠粒充填模型实验的基础上,进一步发展的是网格模型以及逾渗模型,最早制作蚀刻玻璃网络模型的是Mattax和Kyte^[14],后来的感光技术和树脂技术又进一步发展了这种模型^[15]。Weidner^[16]和Meakin^[17]利用这种类似的模型做了基于浮力条件下的油气运移实验,在机理上证明了石油发生优势运移是一种典型的逾渗现象。除此之外,人们还用其他形状的填充物(碎玻璃屑、锥冰晶石、氟石晶粒、石英晶粒等)替换玻璃珠^[18],进行珠粒充填模型实验。

Showalter^[2]的“烃类二次运移和聚集的力学机制”一文发表后,极大地激发了地质学家们的想象力,相继有许多科学家对他提出的理论和现象进行深入的探讨^[19~21]。在此基础上,物理模拟、数

值模拟和理论研究方面也相应得以迅速发展。

经物理模拟证实,油气在砂岩模型中的运移是非常不均一的,在盆地尺度上油气运移通道的体积占储层体积的很小的比例^[19,20]。在输导层物性确定的条件下,单纯浮力以及相对较小的驱动力是油气形成优势二次运移路径的重要因素^[22]。管状模型有利于探讨孔隙介质条件下流体运移的机理,而大尺度的箱体模型能够进行不同类型输导通道和水动力学及构造应力条件下运移状况的研究^[23,24]。

近年来,随着检测设备和分析仪器的进步,针对油气勘探活动中存在的技术问题,人们正试图通过大尺度的物理模拟实验研究隐蔽油气藏、深盆气藏等油气藏的成藏机理^[23~25],模拟高温、高压条件下的油气运移、天然气水溶对流、油气水混相涌流^[25],探讨在地质圈闭或沉积岩层中,油气运移和聚集的动力学机制,分析地应力、水动力强度、圈闭几何形态、储集层岩性特征以及流体性质对油气运移和聚集的影响^[24]。

1.2 数值模拟

早在19世纪中叶达西定律和流体势理论提出以后,人们对多孔介质条件下的均质流体流动方面做了大量工作^[26]。进入20世纪以后,人们对流变介质、毛细管模型、不混溶多相流动和混溶多相流动、指进现象、渗流的统计力学理论等进行了大量的数值模拟工作^[18,26]。国内、外的许多盆地模拟专家利用这些理论进行了地史过程中油气二次运移的研究^[27~29]。

鉴于油气运移过程的历史性和研究中所遇到的种种困难,油气二次运移与聚集的数值模拟方法一直是油气地质研究中倍受关注的问题^[29]。利用流体势的概念,建立油气势并由此确定油气运移的方向和运移量的思路和方法已逐渐为人们所接受^[28]。但Hubbert油气水势的定义因基准面的选择非常随意,所推导出的油气势和相应的推动力较为抽象^[7],受构造起伏形态的影响过大。以后的一些学者^[2,30]在探讨水动力对油气聚集的作用时,虽然采纳了Hubbert的油气势的概念,但油气运移推动力的计算都采用了在动水条件下油柱高度的动力分析方法^[7],还有些学者加入了两相驱替的渗流力学思想,利用有限元法、差分方法等求解流体宏观渗流方程,使油气二次运移路径和流场的研究得到进一步的发展^[31]。

在石油二次运移数值模拟中,方程的解法、计

算速度和计算机存储能力已经成为制约模拟的重要影响因素。在探索一系列的数值模型和运移理论的同时,科学家们并没有停止过对二次运移动力学方程解法的研究^[28,32]。尽管如此,即使利用超大规模的计算机来解盆地尺度的巨型方程仍有一定的困难^[32,33]。在珠粒充填模型、光栅模型等微观模拟认识和理论发展的基础上,Wilkinson 和 Willemsen^[34]提出的逾渗模型极大地鼓舞了在这一领域工作的科学家们。

近年来,物理学关于两类互不相溶流体驱替的微观模型实验和数值模拟^[35]促进了逾渗(invaseion percolation)理论的提出^[19,34],并被逐渐介绍到油气运移优势通道的研究中^[17],为石油二次运移机理的定量动力学研究提供了新的思想方法和理论^[36]。近年来,IP 模型被一些学者扩展到大尺度模型中^[37]。在宏观尺度上,利用逾渗理论建立的多相排替模型获得的模拟结果与用多相达西方程建立的模型所获得的结果很相像^[37]。

与此同时,还有学者试图向模型中加入物理时间,尝试从动力学角度考虑随机分布的孔隙和喉道孔隙介质网络模型中的渗逾过程^[38]。

1.3 流体运移历史示踪分析

随着含油气岩系中有机-无机反应机制研究的深入进行^[39]和流体包裹体研究技术的不断提高^[40],20 世纪 80 年代末期,人们逐渐认识到对流体-岩石相互作用机理的深入研究,有助于追踪油气运移路径,认识油藏成因和分布特点。20 世纪 90 年代,流体历史示踪分析技术取得了一系列重要成果和新的进展^[41],如烃源岩、沥青和对应原油间有机氮化合物的分布有显著系统性变化^[42],根据流体包裹体特征研究油气运移方向、运移通道以及油气藏形成条件^[40]等。

依据伊利石成岩作用与油气注入事件具有密切的成因联系^[43],利用储层中的自生矿物(主要是伊利石)同位素年代学,分析烃类进入储集层的时间是 20 世纪 80 年代后期国际上逐步发展起来的新技术,并成功地用来分析很多油田和盆地烃类成藏的时间^[24]。

2 理论研究

2.1 运移驱动力

在沉积盆地内,油气自烃源岩内生成,初次运移到输导层后随之发生二次运移,最后在运移动

力和阻力达到平衡的圈闭内聚集成藏。地质条件的非均质性和各种构造活动使得油气运移和聚集的过程复杂化,如较大的水动力作用,输导层和储集层的岩性、物性的空间变化^[2],断裂的分隔和连通等等^[2,4]。在油气运、聚过程中有相当一部分油气因各种地质和物理化学作用而散失,不能聚集成藏,如油气的分子扩散作用、运移通道中的残留作用、水动力破坏、断裂破坏等^[44]。

油气二次运移的发生取决于浮力、水动力及毛细管力三者之间的相对大小。运移过程与浮力、界面张力和粘滞力有关。另外,输导层介质的结构和应力场的空间分布也影响流体的运移^[15,19,20,36]。其中,驱动力对流体模型的影响尤为显著^[15,30]。与油气运移的主要动力和阻力有关的地质因素都会对优势通道的形成过程、通道的形态和运移的效率等产生影响。与油气的浮力对应的影响因素包括油气的密度和粘度、运移通道顶界的构造起伏、地层温度和压力的分布和变化等^[2,45,46];与地层的毛细管力对应的地质因素则包括输导层的岩相变化^[47]、盖层的封闭性、断裂的阻挡和连通^[44]等。但各种因素对于运移方式和运移通道的影响程度,不同的学者仍有不同的意见。Gussow^[45]和 Hindle^[47]等强调运移通道的形态和位置在很大程度上受构造形态的控制,但 Rhea 等^[48]则认为输导层内岩石渗透率的侧向变化是控制这种非均质性的重要因素,尽管这种变化发生在同一岩相内。

2.2 优势通道

国内、外学者对油气的二次运移过程进行了大量模拟实验^[19~25]和数值模拟研究^[28~38]。研究证明,油气二次运移只通过局限的优势通道进行,油气运移空间可能只占据整个输导层的 1% ~ 10%^[2,47,49]。

油气通过有限的优势通道进行运移是沉积盆地输导系统的非均质性、能量场的非均一性和流体物性等多种因素共同作用的结果。油气的二次运移既可能沿着储集层或不整合面侧向运移,也可能沿着断裂穿层而过进行垂向运移^[50]。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,一般可达数公里;在侧向上只要具有足够的油气量,运移通道连续性好,油气运移的距离为几十公里乃至数百公里也是可能的^[44]。

二次运移的通道还可能是岩石中的溶孔、溶

洞、断裂、裂隙和不整合面^[3]。断裂带既可以作为通道,促进油气的运移,也可能作为封闭层,对油气起到封闭作用^[50]。但目前对于断裂作为油气运移通道的研究多集中在断裂开启的可能性和有效性方面,而对油气在断裂内部如何运移的讨论不多。油气沿断层面或断裂带的运移特征既与断层本身的特征有关,又受断裂两侧被断开地层的构造形态的影响^[7]。

郝芳^[5]认为油气的优势运移通道或运移路径除受输导层的非均质性影响外,源岩排烃的非均质性和油气在输导层中的运移行为对油气与输导层岩层的接触体积大小起控制作用。向才富等^[51]通过松辽盆地西部斜坡带400余口探井的回剥分析,识别出了4种类型的输导脊,其时空组合形成了西部斜坡带油气运移的主输导通道,从实例上验证了油气沿优势通道运移的客观性。

2.3 突发式成藏

连续稳态流动和周期性(幕式)瞬态流动是沉积盆地流体的两种流动方式^[52]。在与沉积型超压系统有关的含油气系统中,由于盆地演化的多期次的断裂作用引起的幕式沉降和充填,以及伴生的多期热事件,使得超压封存系统经历破裂、泄压、愈合、增压等振荡性动力学演化旋回。流体赋存状态的非均质性、流体流动的瞬态温度响应和运移相态分异及其揭示的多期流体相互作用是流体幕式流动的有效识别标志。为了研究沉积盆地流体的幕式瞬态流动机理,20世纪90年代以来,超压的发育机制、超压流体的流动样式和超压环境油气成藏机理成为油气运移研究的重要领域^[7,53]。

根据断裂活动的幕式特征及其对油气藏的控制作用的研究成果,金之钧^[54]提出了“突发式”成藏模式的设想,并在最近的研究中发现了沸腾包裹体的证据^[55,56],进一步证明了油气成藏过程具有突变性质。吕廷防等^[50]也在实验研究中证实了油气以混相涌流的形式通过断裂运移的观点。

2.4 成藏体系

Dow于1972年首先提出了含油气系统概念^[57],历经Perrodon^[58], Demaison^[59], Meissner^[60], Ummishek^[61]及Magoon^[62]等人补充、修改而完善。这一理论从控制油气藏分布的地质因素,发展到生烃盆地、石油生成系统(hydrocarbon machine)、独立含油气系统和成藏要素时空定位等理论,一直

到由Magoon和Dow提出的含油气系统^[1]。国内在20世纪80年代末期开始引入“含油气系统”概念,此后一些学者对此进行了积极的探索^[63]。但到目前为止,不同学者之间对其确切含义的理解仍存在差异。

按照系统论的定义并结合油气地质特点,金之钧等^[54]提出了油气成藏体系的新理论,其内涵与Magoon等含油气系统有所不同。他强调成藏过程的自然性,使用“元素-结构-功能”的“系统”思想进行石油地质研究,强调油源、疏导体系和圈闭之间的相互关联、相互制约,更突出了具有纽带作用的疏导体系研究。

油气成藏体系理论从成藏机理和系统论的观点定义了油气成藏体系的结构、分类,确定了油气成藏体系分类的鉴别标志。油气成藏体系由烃源体、疏导体和圈闭3个基本元素构成;每一个基本元素又构成了各自相对独立的子系统;3个子体系(元素)的属性特征以“元”来表征,系统所产生的功能效应以“体”来表征,进而提出了“三元一体”化的研究方法和油气成藏体系的命名原则^[63]。

2.5 三场耦合

油气运移是地下流体系统和固体系统相互作用的复杂过程^[64]。应力场、温度场及压力场对地下流体活动状态的影响越来越受到关注。近几年兴起的油气成藏动力学对沉积盆地的温度、压力、势能、应力等多种动力学的研究取得了长足的进展,并向多种动力场耦合方向发展^[65]。作彦卿^[66]通过研究含油气盆地双重介质体系内流体与岩体相互的力学作用关系,提出双重介质体系内渗流场、岩体地应力场和地温场耦合的非线性动力学模型,使三场耦合理论研究迈上了新的台阶。

压性的构造应力场对盆地油气运移和聚集具有重要的影响,流体有从高应力区向盆地内以主干断裂和塑性变形带为代表的低应力区运移的趋势,弱张强剪伴挤压的地应力环境最有利于油气运移和聚集^[67]。温差引起的局部应力相当于孔隙压力的作用,使得油气从高势区向周围低势区运移。为了得到一定地质历史时期的油气运移的特征,需反演和模拟古构造应力场、古流体势的分布及地温场演化史。

3 研究展望

前人对含油气盆地内发生的油气运移过程从

各个方面进行了广泛的研究,已经取得了丰富的成果与认识(图1),但由于运移的动态过程非常复杂,且大都发生在地质历史时期,其时间非常短暂,因而涉及油气运移过程的许多问题仍未解决,影响到了对含油气盆地内油气运聚过程的了解和认识。

1) 油气在输导层中运移的优势通道研究、以及影响油气运移通道的物理化学条件、地质因素和数值模拟方法的探索为油气运移领域研究的主要发展方向。

2) 前人在微观孔隙介质中互不混溶流体的排

替数值模拟基础上所提出的逾渗(invasion percolation)方法,还很难涉及物理时间和水动力的问题,因而在实际的应用中和在不同尺度间的统一性方面还有许多问题需要解决。

3) 作为油气运移的主要运移通道之一,断层启闭性评价方法研究,尤其是断裂带三维空间的输导特征和启闭史研究是油气运移路径研究的关键。

4) 有机包裹体及油气运移富集过程中所形成的次生包裹体的测试技术将成为研究油气运移和

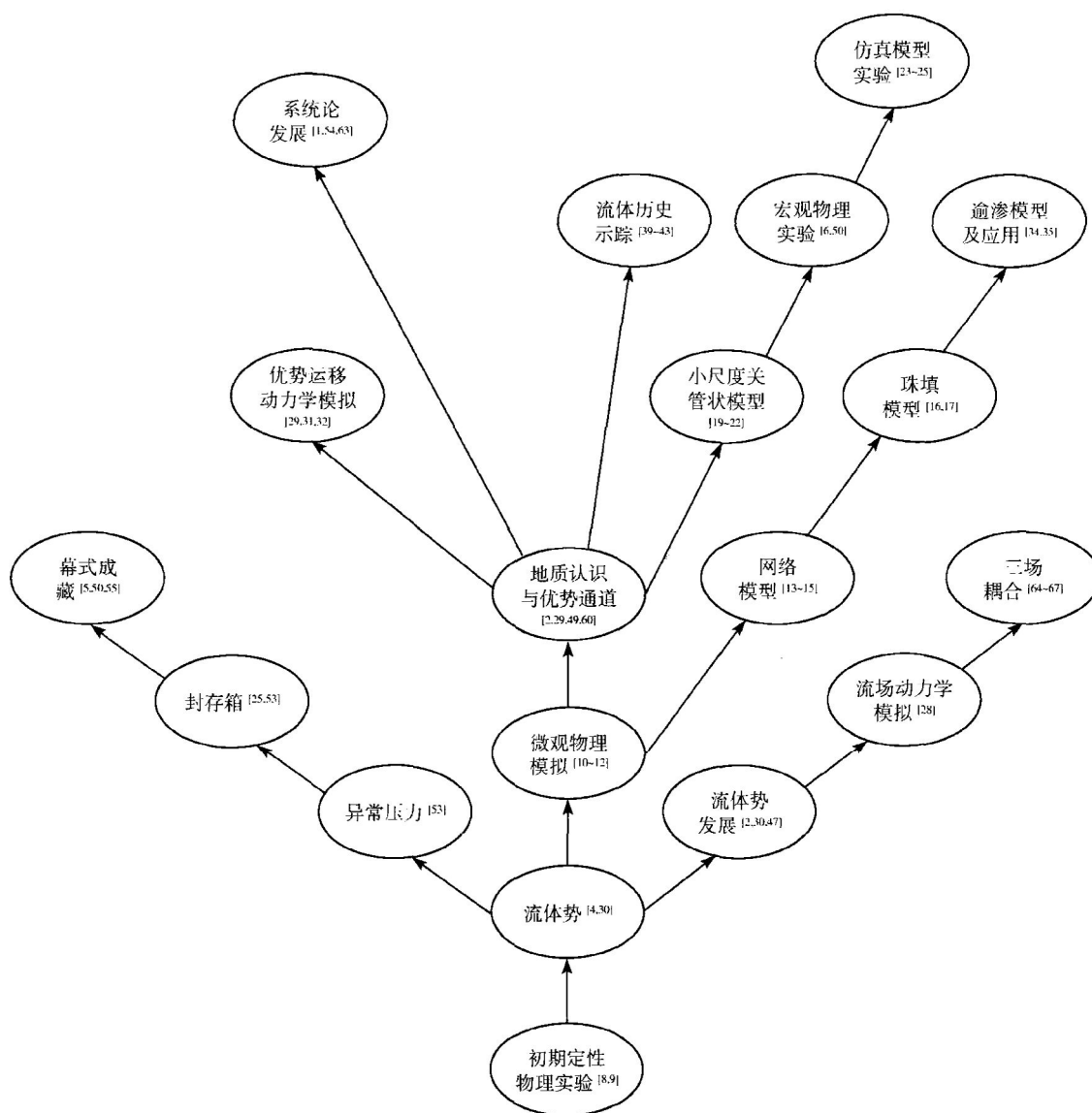


图1 油气二次运移理论及方法研究进展谱系图

Fig.1 Hierarchical diagram showing progresses in theory and method studies of secondary hydrocarbon migration

聚集过程中的古压力、古温度、流体成分的有效手段。

5) 关于油气运移、聚集进程中水-油-岩相互作用机理及其对自生矿物的形成和转化的影响过程的研究还不够深入,尚未建立能客观反映油气运移、聚集状况的自生矿物标志。

6) 构成地下流体动力场的温度场、压力场、势能场和构造应力场内部的各因素间存在着相互联系、彼此耦合的关系,而且各场之间也常常彼此影响、相互制约。因此,采用动态、定量的动力学方法和整体、耦合的观点研究古流体运移问题是今后三场研究的主要方向。

参 考 文 献

- Magoon L B, Dow W G. The petroleum system[A]. In: Magoon L B, Dow W G, eds. The petroleum system—from source to trap[C]. AAPG Memoir, 1994, 60: 3–22
- Schowalter T T. Mechanics of secondary hydrocarbon migration and entrapment[J]. AAPG Bull, 1979, 63(5): 723–760
- 李明诚. 石油与天然气运移(第二版)[M]. 北京:石油工业出版社, 1994
- Li Mingcheng. Migration of oil and gas(2nd edition)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994
- Hubbert M K. Entrapment of petroleum under hydrodynamic conditions[J]. AAPG Bull, 1953, 37(8): 1954–2026
- 郝芳, 邹华耀, 姜建群. 油气成藏动力学及其研究进展[J]. 地质前缘, 2000, 7(3): 11–21
- Hao Fang, Zhou Huayao, Jiang Jianqun. Dynamics of petroleum accumulation and its advances[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(3): 11–21
- 曾溅辉, 金之钧, 王伟华. 油气二次运移和聚集实验模拟研究现状与发展[J]. 石油大学学报, 1997, 21(5): 94–97
- Zeng Jianhui, Jin Zhijun, Wang Weihua. Status and advances of the studies on the experimental simulation of secondary hydrocarbon migration and accumulation[J]. Journal of the University of Petroleum, 1997, 21(5): 94–97
- 罗晓容. 油气运聚动力学研究进展及问题[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(5): 337–347
- Luo Xiaorong. Review of hydrocarbon migration and accumulation dynamics[J]. Natural Gas Geoscience, 2003, 14(5): 337–347
- Emmons W H. Experiments on accumulation of oil in sands[J]. AAPG Bull, 1921, 5: 103–104
- Illing V C. The migration of oil and natural gas[J]. Jour nst Petrol Technol, 1933, 19(4): 229–260
- Berg R R. Capillary pressure in stratigraphic traps[J]. AAPG Bull, 1975, 59(6): 939–959
- Tiratosso E N. Petroleum geology[M]. New York: McGraw-Hill, 1951. 1–449
- Chatenever A, Calhoun J C. Visual examinations of fluid behavior in porous media (Part I) [J]. AIME Petroleum Transactions, 1952, 195: 149–156
- Kimbler K D, Ali S M F. Scaled physical modeling of steam-injection experiments[J]. Society of Petroleum Engineers Reservoir Engineering, 1991, 18(8): 467–469
- Mattax C C, Kyte J R. Imbibition oil recovery from fractured, water-drive reservoir[J]. SPE Journal, 1962, 2(6): 177–184
- Lenormand R, Touboul E, Zarcone C. Numerical models and experiments on immiscible displacements in porous media[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1988, 189: 165–187
- Weidner D E, Schwartz L W. An experimental and numerical investigation of buoyancy-driven two-phase displacement[J]. Phys Fluids A, 1991, 3(9): 2076–2080
- Meakin P, Wagner G, Vedvik A. Invasion percolation and secondary migration: experiments and simulations[J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17: 777–795
- Chatzis I, Dullien F A L. Dynamic immiscible displacement mechanisms in pore doublets: theory vs. experiments[J]. Journal of Colloids and Interface Science, 1983, 91(1): 199–222
- Dembicki H J, Anderson M J. Secondary migration of oil: experiments supporting efficient movement of separate, buoyant oil phase along Limited conduits[J]. AAPG Bull, 1989, 73(8): 1018–1021
- Catalan L, Xiaowen F, Chatzis I. An experimental study of secondary oil migration[J]. AAPG Bull, 1992, 76(5): 638–650
- Tokunaga T, Mogi K, Matsubara O. Buoyancy and interfacial force effects on two-phase displacement patterns: an experimental study[J]. AAPG Bull, 2000, 84(1): 65–74
- 张发强, 罗晓容, 苗盛, 等. 石油二次运移的模式及其影响因素[J]. 石油实验地质, 2003, 25(1): 69–75
- Zhang Faqiang, Luo Xiaorong, Miao Sheng, et al. The patterns and its effect factors of secondary hydrocarbon migration[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(1): 69–75
- 陈章明, 张云峰, 韩有信, 等. 凸镜状砂体聚油模拟实验及其机理分布[J]. 石油实验地质, 1998, 20(2): 166–170
- Chen Zhangming, Zhang Yunfeng, Han Youxin, et al. A modelling experiment and mechanism analysis of oil accumulation in pod-like sand-body[J]. Petroleum Geology & Experiment, 1998, 20(2): 166–170
- 曾溅辉, 金之钧. 油气二次运移和聚集物理模拟[M]. 北京:石油工业出版社, 2000
- Zeng Jianhui, Jin Zhijun. An experiment of hydrocarbon secondary migration and accumulation[M]. Beijing: Petroleum Industry press, 2000
- 张义纲, 陈彦华, 陆嘉炎, 等. 油气运移及其聚集成藏研究[M]. 南京: 河海大学出版社, 1997
- Zhang Yigang, Chen Yanhua, Lu Jiayan, et al. Research of hydrocarbon migration and its accumulation[M]. Nanjing: Hehai University Press, 1997
- Scheidegger A E. The physics of flow through porous media[M]. Toronto, Canada: Univ of Toronto Press, 1974. 20–240
- 陈荷立. 油气运移研究的有效途径[J]. 石油与天然气地质,

- 1995, 16(2): 126 ~ 131
Chen Heli. An efficient approach to hydrocarbon migration researches [J]. *Oil & Gas Geology*, 1995, 16(2): 126 ~ 131
- 28 石广仁. 油气盆地数值模拟方法[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994. 1 ~ 172
Shi Guangren. Numerical methods of petroliferous basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994. 1 ~ 172
- 29 Ungerer P, Bessis F, Chenet Y, et al. Geological and geochemical models in oil exploration: principles and practical examples [A]. In: Demaison G, ed. *Petroleum geochemistry and basin evaluation* [C]. AAPG Memoir, 1984, 35: 53 ~ 57
- 30 Dahlberg E C. Applied hydrodynamics in petroleum exploration [M]. New York: Springer-Verlag, 1982. 1 ~ 171
- 31 Bethke C M, Reed J D, Oltz D F. Long-range petroleum migration in the Illinois basin [J]. *AAPG Bull*, 1991, 75(50): 925 ~ 945
- 32 袁益让, 赵卫东, 程爱杰, 等. 三维油资源运移聚集的模拟和应用 [J]. *应用数学和力学*, 1999, 20(9): 933 ~ 941
Yuan Yirang, Zhao Weidong, Cheng Aijie, et al. Simulation and application of three dimensional migration & accumulation of oil resources [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 1999, 20(9): 933 ~ 941
- 33 刘伊克, 常旭. 盆地模拟水动力油气二次运移隐式多重网格法 [J]. *地球物理学报*, 1998, 41(3): 342 ~ 347
Liu Yike, Chang Xu. The implicit multigrid method for the secondary hydrocarbon migration driven by water [J]. *Acta Geophysica Sinica*, 1998, 41(3): 342 ~ 347
- 34 Wilkinson D. Percolation effects in immiscible displacement [J]. *Physical Review A*, 1986, 34: 1 380 ~ 1 391
- 35 Carruthers D, Ringrose P. Secondary oil migration: oil-rock contact volumes, flow behavior and rates [A]. In: Parnell J, ed. *Dating and duration of fluid flow and fluid-rock interaction* [C]. London: Geological Society Special Publications, 1998, 144: 205 ~ 220
- 36 Ewing R E. Aspects of upscaling in simulation of flow in porous media [J]. *Advances in Water Resources*, 1997, 20(5 ~ 6): 349 ~ 358
- 37 Kueper B H, McWhorter D B. The use of macroscopic percolation theory to construct large-scale capillary pressure curves [J]. *Water Resource Res*, 1992, 28(9): 2 425 ~ 2 436
- 38 Aker E, Maloy K J. Dynamics of stable viscous displacement in porous media [J]. *Physical Review E*, 2000, 61(3): 2 936 ~ 2 946
- 39 Surdam R C. Organic-inorganic interactions and sandstone diagenesis [J]. *AAPG Bull*, 1989, 73(1): 1 ~ 23
- 40 陈建平, 查明, 周瑶琪. 有机包裹体在油气运移研究中的应用综述 [J]. *地质科技情报*, 2000, 19 (1): 61 ~ 64
Chen Jianping, Zha Ming, Zhou Yaoqi. Application of organic inclusion in oil-gas migration [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2000, 19(1): 61 ~ 64
- 41 钟宁宁, 张枝焕. 石油地球化学进展, 现代油气勘探理论和技术培训教材(六) [M]. 北京: 石油工业出版社, 1998. 102
Zhong Ningning, Zhang Zhihuan. Overview of petrochemistry, training guide book of modern petroleum exploration theory and technology (6) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998. 102
- 42 王铁冠, 李素梅, 张爱云, 等. 利用原油含氮化合物研究油气运移. *石油大学学报(自然科学版)*, 2000, 24(4): 83 ~ 86
Wang Tieguan, Li Shumei, Zhang Aiyun, et al. Oil migration analysis with pyrrolic nitrogen compounds [J]. *Journal of the University of Petroleum*, 2000, 24(4): 83 ~ 86
- 43 张有瑜, 罗修泉. 油气储层自生伊利石 K-Ar 同位素年代学研究现状与展望 [J]. *石油与天然气地质*, 2004, 25(2): 231 ~ 236
Zhang Youyu, Luo Xiuquan. K-Ar isotopic chronological study of authigenic illite in reservoirs [J]. *Oil & Gas Geology*, 2004, 25(2): 231 ~ 236
- 44 Allan U S. Model for hydrocarbon migration and entrapment within faulted structures [J]. *AAPG Bull*, 1989, 73: 803 ~ 811
- 45 Gussow W C. Differential entrapment of oil and gas: a fundamental principle [J]. *AAPG Bull*, 1954, 38: 816 ~ 853
- 46 Tissot B P. Migration of hydrocarbons in sedimentary basins, a geological, geochemical and historical perspective [A]. In: Doligez B, ed. *Migration of hydrocarbons in sedimentary basins* [C]. Paris: Editions Technip, 1987. 1 ~ 19
- 47 Hindle A D. Petroleum migration pathways and charge concentration: A three-dimensional model [J]. *AAPG Bull*, 1997, 81(9): 1 451 ~ 1 481
- 48 Rhea L, Person M, Marsily G D, et al. Geostatistical models of secondary oil migration within heterogeneous carrier beds: a theoretical example [J]. *AAPG Bull*, 1994, 78: 1 679 ~ 1 691
- 49 Egland D A, Mackenzie A S, Mann D M, et al. The movement entrapment of petroleum fluid in the subsurface [J]. *Journal of Geological Society*, 1987, 114: 327 ~ 347
- 50 吕延防, 付广, 高大岭. 油气藏封盖研究 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1996
Lu Yanfang, Fu Guang, Gao Daling. Research on seals of oil or gas reservoirs [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996
- 51 向才富, 夏斌, 解习农, 等. 松辽盆地西部斜坡带油气运移主输导通道 [J]. *石油与天然气地质*, 2004, 25(2): 204 ~ 215
Xiang Chaifu, Xia Bin, Xie Xinong, et al. Major hydrocarbon migration pathway system in western slope zone of Songliao basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2004, 25(2): 204 ~ 215
- 52 罗晓容. 断裂开启与地层中温压瞬态变化的数学模拟 [J]. *石油与天然气地质*, 1999, 20(1): 1 ~ 6
Luo Xiaorong. Mathematical modeling of temperature pressure transient variation in opening fractures and sedimentary formations [J]. *Oil and Gas Geology*, 1999, 20(1): 1 ~ 6
Hunt J M. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments [J]. *AAPG Bull*, 1990, 74 (1): 1 ~ 12
- 54 金之钧, 张一伟, 王捷. 油气成藏机理与分布规律 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2003
Jin Zhijun, Zhang Yiwei, Wang Jie. The accumulation mechanism and distribution regularity of oil and gas [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003
- 55 邱楠生, 金之钧. 油气成藏的脉动式探讨 [J]. *地学前缘*, 2000, 7(4): 561 ~ 567
Qiu Nansheng, Jin Zhijun. Study on pulse entrapment of hydrocarbon

- accumulation[J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(4): 561-567
- 56 Hu Wenxuan, Jin Zhijun, Qiu Nansheng, et al. Boiling process of low temperature formation water in petroleum system, Qaidam Basin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(S0): 77-78
- 57 Dow W G. Application of oil correlation and source rock data to exploration in Williston basin(abs)[J]. *AAPG Bull*, 1972, 56: 615
- 58 Perodon A. Petroleum systems: models and applications[J]. *Journal of Petroleum Geology*, 1992, 15 (3): 319-326
- 59 Demaison G. The generative basin concept[A]. In: Demaison G, Murris R J, eds. *Petroleum geochemistry and basin evaluation*[C]. AAPG Memoir, 1984, 35: 1-14
- 60 Meissner F F. Petroleum geology of the Bakken Formation, Williston basin, North Dakota and Montana[A]. In: Demaison G, Murris R J, eds. *Petroleum geochemistry and basin evaluation*[C]. AAPG Memoir, 1984, 35: 159-179
- 61 Ulmishek G. Stratigraphic aspects of petroleum resource assessment [A]. In: Rice D, ed. *Oil and gas assessment-methods and applications*[C]. AAPG Studies in Geology, 1986, 21: 59-68
- 62 Magoon L B. The petroleum system—a classification scheme for research, resource assessment, and exploration[J]. *AAPG Bull*, 1987, 71(5): 587
- 63 赵文智, 何登发, 池英柳, 等. 中国复合含油气系统的基本特征与勘探技术[J]. *石油学报*, 2001, 22 (1): 6-13
Zhao Wenzhi, He Dengfa, Chi Yingliu, et al. Major characteristic sand exploration technology of multi-source petroleum systems in China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2001, 22 (1): 6-13
- 64 陶一川. 石油地质流体力学分析基础[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993
- Tao Yichuan. *Hydrodynamics analysis of petroleum geology* [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1993
- 65 叶加仁, 王连进, 邵荣. 油气成藏动力学中的流体动力学[J]. *石油与天然气地质*, 1999, 20(2): 182-185
- Ye Jiaren, Wang Lianjin, Shao Rong. Fluid dynamic fields in pool forming dynamics of oil & gas[J]. *Oil and Gas Geology*, 1999, 20 (2): 182-185
- 66 作彦卿, 高荣芳. 影响油气运移的应力场温度场渗流场耦合的双重介质模型[J]. *西安理工大学学报*, 1998, 14(2): 113-117
- Wu Yanqing, Gao Rongfang. A double porosity media model of coupled stress, geotemperature and seepage fields affecting oil-gas migration[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 1998, 14 (2): 113-117
- 67 杨玉凤, 史占楨, 王明明, 等. 黄骅坳陷中区应力场及与天然气富集的关系[J]. *石油与天然气地质*, 1996, 17(3): 191-194
- Yang Yufeng, Shi Zhanzhen, Wang Mingming, et al. Relationship between stress field and natural gas enrichment in central huanghua depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 1996, 17(3): 191-194

(编辑: 李树森)

世界石油储量和产量形势分析

据阿吉普公司向 32 届地质大会提交的《2004 世界油气回顾》一书, 2003 年, 全球石油产量 9.24×10^9 L/d (38.77×10^8 t/a), 天然气产量 2.62×10^{12} m³, 石油剩余可采储量 1.31×10^{14} L (约 1527×10^8 t)。全球石油和天然气的储量、产量和消费量有明显的地域特征: 北美、西欧和亚太发达国家的油气储量小于产量, 产量又小于消费量; 中东、非洲、拉美和亚太发展中国家的油气储量大于产量, 产量又大于消费量。由此分出明显的油气消费区域和油气资源供给区域。

2003 年, 中国生产石油 (包括天然气液) 4.01×10^8 L/d (1.75×10^8 t/a), 排世界第 6 位; 前 5 位分别是: 沙特阿拉伯、俄罗斯、美国、伊朗和墨西哥。2002 年, 中国生产天然气 363×10^8 m³, 排世界第 17 位; 前五位分别是: 俄罗斯、美国、加拿大、英国和阿尔及利亚。与 10 年前相比, 美国和俄罗斯的油气产量占世界总产量的比例都有所降低。近 10 年来, 全球生产的原油质量有所下降: 重油比例由 1994 年的 10.9% 增长到 2003 年的 13.8%, 轻油比例从 1994 年的 31.1% 下降到 2003 年的 29.8%。北美洲的重油比例增长幅度最大。

截止 2003 年底, 中国的剩余石油储量为 2.18×10^{12} L (25×10^8 t), 排世界第 11 位; 前 5 位分别是: 沙特阿拉伯、伊朗、伊拉克、科威特和阿拉伯联合酋长国。中国截止 2003 年底的剩余天然气储量为 2.6×10^{12} m³, 排世界第 15 位; 前 5 位分别是: 俄罗斯、伊朗、卡塔尔、沙特阿拉伯和阿拉伯联合酋长国。世界石油剩余储量主要分布在中东、俄罗斯、委内瑞拉和北非; 世界天然气剩余储量主要分布在俄罗斯、中东、北美和北非。这也是我们实现“走出去”战略的主要目标区。

(据侯洪斌、钱基等供稿)