

(第三版)

# 石油与天然气运移

李明诚 编著

石油工业出版社  
Petroleum Industry Press

# 石油与天然气运移

(第三版)

李明诚 编著

石油工业出版社

## 内 容 提 要

本书着重论述了油气运移、聚集的机制和原理,是一部有关石油地质基础理论的专著。书中探讨了油气运聚过程中的动力学和运动学问题、常规和非常规油气藏的形成与破坏、异常压力封隔体与油气分布、含油气系统的评价与应用、沉积盆地与油气资源、地流体与地壳运动和石油成因等问题,并概述了研究油气运移的有机地球化学、地球物理、实验室和数值模拟等各种方法。总之,本书较系统地介绍了国内外有关油气运移研究的最新成果,力求能使读者了解油气运移研究的现状和发展,从而建立起油气运移学科的现代概念。

本书可供石油地质科研人员、油气勘探工作者以及有关大专院校师生参考和使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

石油与天然气运移/李明诚编著. —3版.

北京:石油工业出版社,2004.7

ISBN 7-5021-4542-7

I. 石...

II. 李...

III. 油气运移

IV. P618.130.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第002714号

---

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里2区1号楼 100011)

网 址: [www.petropub.com.cn](http://www.petropub.com.cn)

总 机: (010) 64262233 发行部: (010) 64210392

经 销: 全国新华书店

印 刷: 石油工业出版社印刷厂印刷

---

2004年7月第1版 2004年7月第1次印刷

787×1092毫米 开本: 1/16 印张 22.5

字数: 572千字 印数: 1—1500册

---

书号: ISBN 7-5021-4542-7/TE·3178

定价: 60.00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

### 第三版前言

自 1994 年《石油与天然气运移》第二版出版以来,随着油气勘探领域的不断扩大和深化,石油地质理论和各种勘探技术也得到了很大的发展。特别是各种实验室模拟和数值模拟以及各种测试技术的进步与广泛应用,在动态分析和综合研究的思路和方法指导下,油气运移的研究也获得了空前的进展。目前已涌现出诸如:油气运移与含油气系统,压力封隔体与油气分布,优势运移通道方向与有效圈闭,非常规油气的成藏机制,叠合盆地中的油气运移,地流体活动与石油的成因等一大批跨学科、高质量的科研成果。再加上三维地震、数控测井、高分辨率层序地层学、水平钻井等一系列勘探技术的创新,使人们能更清晰地识别地下岩层的性质、产状和分布,能够获得更多的地下信息和参数。所有的这些进展也大大提高了恢复各种古参数的精度,从而能更有效地进行动态分析和定量模拟。现在人们不仅能定性地说明油气是怎样从烃源岩到圈闭,而且已初步能定量、定时地描述油气的运聚过程,可以说这十年来油气运移的研究有了质的飞跃。

面对这些进展,为了使读者能建立起油气运移研究的现代概念,笔者再一次鼓起勇气从 2001 年开始编写第三版。全书共分六章。第一章油气运移研究的基本概念,主要是叙述油气运移研究的内容和思路以及所涉及的物理学基础。第二章初次运移的研究,从烃源岩孔隙结构的非均质性来理解排烃机理,并对渗流和扩散流的共存和转换、幕式排烃和排烃门限、时期、厚度及效率等问题进行了探讨。第三章二次运移的研究,论述了二次运移的动力学环境,盖层和断层对运移通道的控制作用,有效运移通道空间和优势运移通道方向的概念及确定方法,说明了浮力流是二次运移的基本模式,并对二次运移的距离、速度和效率等问题进行了探讨。第四章油气聚集的研究,强调了有效烃源岩、有效盖层和有效圈闭是油气聚集成藏最基本的地质条件,特别是区域盖层的重要作用,并对油气成藏的机制和过程、油气藏的破坏与油气的再运移、油气藏的中值年龄和自然寿命等问题进行了探讨。第五章油气运移研究的主要方法,对有机地球化学、地球物理、实验室模拟和数值模拟等方法进行了概述。第六章油气运移的相关研究,除对比了油气在碎屑岩和碳酸盐岩中的运聚特征外,还探讨了异常压力与流体封隔体、油气运移与含油气系统、沉积盆地与油气资源、地流体与地壳运动和石油成因等与油气运移相关的问题。

总之,笔者力求能明确地论述油气运移的基本概念、原理和方法,力求能使读者了解油气运移研究的现状和进展。面对如此复杂而又涉及多学科的问题,尽管笔者花费了 3 年的时间,但个人的力量总是有限的并深感力不从心,还有许多有关的内容和方法未能编入本书中,实属遗憾和不足。此外,在引证和介绍国内外的研究成果和资料时,也多是反映个人的理解和认识,因而也难免产生一些错误。笔者相信随着石油地质科学的不断发展,书中的某些内容、观点和定量结果也将会不断得到补充和修正。

本书今日能够得以出版,首先要感谢胡见义院士和黄第藩教授的推荐,以及石油工业出版社的大力支持和帮助。也要感谢中国石油化工集团公司石油勘探开发研究院的图书室和冯

力高级工程师为本书提供和查询了大量的外文资料。同时，在本书编写期间，一直得到中国地质大学能源地质系、石油大学盆地与油藏研究中心、中国石油天然气集团公司勘探开发研究院和廊坊分院、中国石油天然气股份有限公司及各油田分公司、中国石油化工股份有限公司及各油田分公司、中国海洋石油股份有限公司和各分公司以及中国科学院有关研究所等单位的关心和支持，笔者在此一并表示衷心地感谢。

# 目 录

|                       |      |
|-----------------------|------|
| 第一章 油气运移研究的基本概念       | (1)  |
| 第一节 油气的运移             | (1)  |
| 第二节 油气运移研究的主要内容和思路    | (2)  |
| 一、油气运移研究的主要内容         | (2)  |
| 二、油气运移研究的主要思路         | (2)  |
| 第三节 油气运移的物理学基础        | (4)  |
| 一、温度                  | (4)  |
| 二、压力                  | (8)  |
| 三、应力                  | (10) |
| 四、流体势                 | (14) |
| 五、压实与欠压实              | (19) |
| 六、沉积岩石的孔隙、孔隙度及孔隙结构    | (26) |
| 七、绝对渗透率、相对渗透率及临界运移饱和度 | (31) |
| 八、比表面、吸附及润湿性          | (34) |
| 九、界面张力、毛细管压力及排替压力     | (38) |
| 十、临界温度、临界压力及凝析气       | (41) |
| 十一、扩散作用               | (44) |
| 十二、石油与天然气的物性比较        | (46) |
| 第二章 初次运移的研究           | (50) |
| 第一节 初次运移的动力和阻力        | (50) |
| 一、初次运移的动力             | (50) |
| 二、初次运移的阻力             | (63) |
| 第二节 初次运移的相态           | (64) |
| 一、石油的初次运移相态           | (64) |
| 二、天然气的初次运移相态          | (72) |
| 三、初次运移相态的演变           | (76) |
| 第三节 初次运移的通道           | (77) |
| 一、烃源岩的组构              | (78) |
| 二、烃源岩中的主要运移通道         | (79) |
| 第四节 初次运移的模式           | (80) |
| 一、水相运移的模式             | (80) |
| 二、油相运移的模式             | (84) |
| 三、气相运移的模式             | (88) |
| 四、混相—微裂隙运移模式          | (90) |
| 五、初次运移模式的演变           | (91) |

|                       |       |
|-----------------------|-------|
| 第五节 初次运移的几个问题 .....   | (93)  |
| 一、初次运移的时期 .....       | (93)  |
| 二、初次运移的距离和速率 .....    | (97)  |
| 三、排烃量和排烃率 .....       | (99)  |
| 第三章 二次运移的研究 .....     | (104) |
| 第一节 二次运移的动力与阻力 .....  | (104) |
| 一、二次运移空间的动力学环境 .....  | (104) |
| 二、二次运移的动力 .....       | (105) |
| 三、二次运移的阻力 .....       | (112) |
| 第二节 二次运移的相态 .....     | (115) |
| 一、二次运移相态的继承与转换 .....  | (115) |
| 二、二次运移的相态与流动类型 .....  | (117) |
| 三、二次运移主要相态的纵向演变 ..... | (119) |
| 第三节 二次运移的通道 .....     | (120) |
| 一、二次运移通道的主要类型 .....   | (120) |
| 二、二次运移通道的组合方式 .....   | (127) |
| 三、二次运移的有效通道空间 .....   | (130) |
| 第四节 二次运移的一般模式 .....   | (132) |
| 一、浮力流模式 .....         | (132) |
| 二、渗流模式 .....          | (135) |
| 三、势平衡流模式 .....        | (138) |
| 四、扩散流模式 .....         | (139) |
| 五、渗透流模式 .....         | (142) |
| 第五节 二次运移的几个问题 .....   | (143) |
| 一、二次运移的优势通道方向 .....   | (143) |
| 二、二次运移的主要时期 .....     | (147) |
| 三、二次运移的效率 .....       | (149) |
| 第四章 油气聚集的研究 .....     | (154) |
| 第一节 油气的聚集 .....       | (154) |
| 一、有关概念 .....          | (154) |
| 二、盖层 .....            | (156) |
| 第二节 油气聚集的机制与过程 .....  | (168) |
| 一、油气在圈闭中聚集的机制 .....   | (168) |
| 二、油气聚集的过程 .....       | (175) |
| 三、油气藏形成的时间和期次 .....   | (179) |
| 第三节 油气运聚成藏的地质条件 ..... | (182) |
| 一、有效烃源岩 .....         | (182) |
| 二、有效盖层 .....          | (184) |
| 三、有效圈闭 .....          | (185) |
| 四、断层 .....            | (185) |

|                                |       |
|--------------------------------|-------|
| 五、储、盖层的物性差异与生、储层的比例·····       | (186) |
| 六、生、储、盖层的时空跨距和生、运、聚作用的连续性····· | (187) |
| 第四节 非常规的油气藏和油气资源·····          | (187) |
| 一、非常规油气藏·····                  | (188) |
| 二、非常规的油气资源·····                | (196) |
| 第五节 油气藏的破坏与油气的再运移·····         | (199) |
| 一、油气藏的破坏·····                  | (199) |
| 二、油气的再运移·····                  | (203) |
| 第五章 油气运移研究的主要方法·····           | (208) |
| 第一节 有机地球化学的研究方法·····           | (208) |
| 一、利用有机地球化学参数研究石油的初次运移·····     | (208) |
| 二、利用有机地球化学参数研究油气的二次运移·····     | (212) |
| 三、利用有机地球化学参数研究油气的聚集·····       | (220) |
| 第二节 地球物理的研究方法·····             | (223) |
| 一、利用压实曲线研究油气运移·····            | (223) |
| 二、利用水动力学研究油气的运移和聚集·····        | (227) |
| 三、利用地层原油物性研究油气运移·····          | (234) |
| 四、利用荧光显微分析技术研究油气运移·····        | (237) |
| 五、利用矿物包裹体研究油气运移·····           | (241) |
| 六、利用原油孢粉追索油源和运移方向·····         | (245) |
| 第三节 实验室模拟和数值模拟的研究方法·····       | (247) |
| 一、实验室模拟·····                   | (248) |
| 二、数值模拟·····                    | (253) |
| 第六章 油气运移的相关研究·····             | (277) |
| 第一节 石油与天然气运移、聚集特征的比较·····      | (277) |
| 一、石油与天然气有关物性的比较·····           | (277) |
| 二、石油与天然气运移特征的比较·····           | (278) |
| 三、石油与天然气聚集特征的比较·····           | (280) |
| 第二节 碳酸盐岩中油气的运移和聚集·····         | (281) |
| 一、碳酸盐烃源岩的特征·····               | (281) |
| 二、碳酸盐岩中油气运移的特征·····            | (282) |
| 三、碳酸盐岩中油气聚集的特征·····            | (285) |
| 第三节 异常压力与压力封隔体·····            | (287) |
| 一、异常压力·····                    | (287) |
| 二、压力封隔体·····                   | (293) |
| 第四节 含油气系统的评价与应用·····           | (297) |
| 一、含油气系统·····                   | (297) |
| 二、含油气系统的评价·····                | (302) |
| 三、应用实例·····                    | (307) |
| 第五节 沉积盆地与油气资源·····             | (310) |

|                         |       |
|-------------------------|-------|
| 一、沉积盆地.....             | (310) |
| 二、油气资源.....             | (314) |
| 第六节 地流体活动与油气运移.....     | (323) |
| 一、地流体活动.....            | (323) |
| 二、油气运移是沉积盆地中的地流体活动..... | (325) |
| 三、研究地流体引发的思考.....       | (330) |
| 结束语.....                | (334) |
| 参考文献.....               | (334) |

# 第一章 油气运移研究的基本概念

## 第一节 油气的运移

石油和天然气●都是流体矿产，其最大特征就是具有运移性。当油气受到某种动力驱使时可以在地壳内发生流动，这种流动称为油气的运移。油气也是一种地流体（Geofluid），油气的运移主要是属于盆地内部产生的含烃地流体活动，它的时空范围是从源岩到地表。

人们在长期勘探和开发油气的过程中逐渐认识到，油气主要生成于沉积盆地富含有机质的细屑岩石中，而大部分储集在孔隙度、渗透率条件比较好的粗粒岩石中。这样油气从生油岩中的分散状态到储集岩圈闭中的聚集状态，其间必有一个运移的过程。为了研究这一过程，Illing（1933）曾把油气运移划分为初次运移、二次运移和三次运移，并把初次运移定义为油气自生油岩向储集岩中的运移，把二次运移定义为油气在邻近生油层的储集层中的运移以及形成第一次油气聚集，而把聚集后由于外界地质条件的变化而使油气再次发生的运移叫做三次运移。后来人们发现这种划分很容易引起混乱，因为实际上很难把二次和三次运移区别开。所以，现在只划分出初次运移和二次运移。

初次运移（Primary migration）是指油气在烃源层中的运移以及向运载层（Carrier bed）或储集层中的运移。

二次运移（Secondary migration）是指油气进入储集层或运载层以后的一切运移。它包括油气在储集层或运载层内部的运移，油气沿断层、裂隙、不整合面等通道的运移以及聚集起来的油气由于外界地质条件的变化而引起的再次运移（图1—1）。

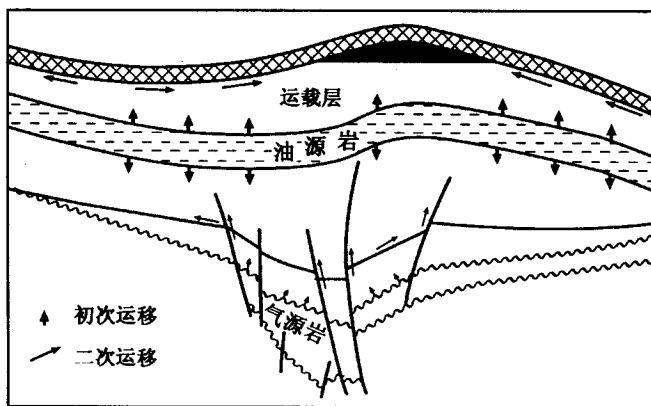


图1—1 油气的初次运移和二次运移示意图

上述定义是人为的把一个自然连续过程在时、空上划分成两个阶段和两个部分，由此很容易产生错觉，似乎初次运移和二次运移在时间上有先后之分，这对某一油气质点来说可以这么认为。若对整个油气运移作用而言，二次运移紧随第一个油气质点进入运载层后而发生，实际上它们是一个几乎同时都在发生的连续过程。

此外，在某些地层条件下初次运移和二次运移在空间上也很难绝然分开，例如页岩油（Shale oil）和煤层气（Coalbed gas）等的初次运移和二次运移均发生在生烃的致密层系和煤层中，在宏观上可以认为初次运移和二次运移合为一体。

从油气的生成、聚集到最终的散失、破坏这一自然过程来看，运移是贯穿全过程的纽

● 本书所指天然气主要是烃类气体。

带。由运移作用导致的油气散失破坏是绝对的和持续的。而发生在运移过程中的油气聚集，在时间上是短暂的、在空间上是局部的、在数量上是很小的。可见油气的聚集是相对的和有条件的。

随着对油气运移认识的不断加深，目前对运移阶段的划分又有了三分甚至四分的趋势。笔者认为，在初次运移和二次运移之前可以划分出原始运移（Initial migration）阶段，它是指油气从生油母质中析出和脱离母质表面的过程。这种原始运移具有与初次运移和二次运移不同的物理化学过程。显然，这种三分将使油气运移的研究进一步深化。

## 第二节 油气运移研究的主要内容和思路

### 一、油气运移研究的主要内容

油气运移只有在油气生成以后才能发生，而且利用有机地球化学指标的对比和分异，能较科学地证实地下存在有油气的运移，因此在传统上一直把油气运移放在有机地球化学的学科范围之中。但油气运移主要是发生在地壳中的一种物理作用和现象，应是一门独立的学科，而有机地球化学只是研究油气运移的一种重要方法。

油气运移主要是研究油气运移的动力学和运动学机制。具体地说是研究油气运移的动力、相态、通道和数量等方面的内容，也可以通俗地说是研究油气怎样从烃源岩中排出、什么时候排出、排出多少、运移到什么地方、可能在哪里聚集、至今还能保存下来多少等方面的问题。可见，油气运移既属于基础理论的研究、又是应用性很强的研究。

### 二、油气运移研究的主要思路

油气运移主要是发生在地质历史过程中、并延续至今的作用。因此不能完全用现今的地质条件和参数来研究和评价，必须进行动态分析。油气主要是在沉积岩石中生成、在岩石中运移、在岩石中聚集，油气与岩石相互作用、相互依存均受控于盆地的构造演变和沉积成岩作用。可见油气运移与其他地质作用有千丝万缕的联系，是一个受诸多地质因素制约、涉及多学科的问题。因此，要深刻地认识油气运移必须从各个方面进行综合研究。此外，油气运移在地质历史上留下的行迹比较少，也只有通过与其他地质作用的必然关系，才可能反馈更多油气运移的重要信息和证据。可见，油气运移研究的主要思路就是动态分析和综合研究。

#### （一）动态分析（Dynamic analysis）

动态分析是一个在许多学科中经常提到的术语，但其内容却不禁相同。这里所谓的动态分析，就是要依据外界地质条件在不同时空上的变化，对油气运移进行研究，也就是不能直接用现今的地质条件和参数来分析和描述发生在过去的事件。例如：在理论上我们不能用现今地下岩石的孔隙度、渗透率或突破压力等参数来描述和评价某一地质时期储、盖层的好坏和油气运移的状态；也不能用现今的地层压力、流体势或扩散系数来确定和计算某一地质时期流体运移的方向和数量；同样也不能用烃源岩现今的门限深度来计算某一地质时期的生烃量和排烃量。这就需要建立和采用一些方法，将现今地下的静态参数转换成地质历史的动态参数，才能获得各地史时期的真实情况。

动态分析与“将今论古”的原则有没有矛盾呢？众所周知“将今论古”是地质学研究中的传统方法，即“今天是打开过去的钥匙”。这种观点本身并没有什么不对的地方，因为我们今天只能获得现今的地质资料和参数，也只能从现今出发去分析和恢复过去的古地质情

况。但我们不能简单照搬式地去应用，哪怕是一条随埋深变化的孔隙度曲线、压力曲线或  $R$  值曲线，也只代表现今地下的情况。因为它是各种地质因素相互作用累积至今的综合结果，并不能完全代表地史时期的变化情况。例如，从某钻井的实际资料得知现今地下 2000m 深砂岩孔隙度为 20%，是不是该井任何层位的砂岩在地史时期中只要埋深到 2000m 就具有 20% 的孔隙度呢？若简单地按“将今论古”的方法去分析，这似乎没有什么异议。然而实际情况并非如此，因为地层孔隙度的变化除与上覆负荷压实有关外，还受地质时间、沉积速率、岩性组合、化学成岩、构造应力等作用的影响，而这些因素在各地史时期中是不同的。但对于某些宏观地质现象的定性观察来说“将今论古”则是一种很有效的方法。例如根据对山麓、河流、海岸等现代沉积的观察，就可以直接推知古山麓、古河流、古海岸的沉积形式和相带分布，又例如根据现代火山和地震的观察，也可以直接对比和描述古火山和古地震的各种情景。可见关键是如何利用现今资料去论古的问题。

对那些不能将现今资料直接应用到地史过程中的问题，实际上是一个恢复古参数的问题，如古孔隙度、古压力、古流体势、古  $R$  值、古扩散系数等。如何较准确地求取这些古参数，实际上并没有完全解决。目前大多只能用间接地推导或与实测点相拟合等方法近似地求得。这也就是人们往往迫不得已用现今参数代替古参数的原因，也是人们为什么特别关注那些能直接提供各种古参数的技术，诸如流体包裹体的研究等。可以说如何求取动态参数是石油地质学乃至整个地质学研究中面临的重大问题。

## (二) 综合研究 (Synthesis research)

油气主要产在沉积盆地之中，盆地为油气运移提供了动力、通道、圈闭和相态变化的条件以及最终可能聚集的数量。不同类型的盆地、不同的演化阶段有不同状态和方式的油气运移，可以说盆地的演变决定了油气运移的格局。因此要全面的研究油气运移，必须要在研究沉积盆地的构造史、沉积埋藏史和热史的基础上，再结合生烃、排烃和运聚史的研究才能实现。显然只有认识了盆地的类型和性质、构造和断裂发育的式样和时期、沉积建造和烃源岩的好坏，可能的生、储、盖组合以及生、运、聚作用的时空匹配，才能在宏观上判断油气是具有早期运移、早期成藏的特征，还是具晚期运移、晚期成藏的特征。可见油气运移脱离了综合研究将成为无源之水、无根之木。

对油气运移作用本身也应尽可能采取多种方法进行综合研究。油气运移是一个非常复杂的动力学过程，也是一个地质、地球化学、地球物理等多种因素的耦合过程。因此也应使用地质、地球化学、地球物理等多种方法对它进行研究。例如：利用地下原油的指标、同位素和原油物性的变化来研究油气运移；利用压实曲线、排烃饱和度、微裂隙来研究初次运移；利用流体势、有效运移通道、封隔体、生储盖组合的时空跨距、生运聚作用的匹配来研究油气的二次运移和聚集；利用含烃包裹体、原油中卟啉类氮化物等方法来研究油气的充注时期、方向和过程；根据盖层、地壳抬升剥蚀、断裂、岩浆活动、水动力等情况来研究油气藏的保存及油气的再运移等。

油气运移的综合研究，除上述各种定性方法外还包括定量的研究。当前主要的定量研究方法就是利用计算机进行盆地模拟和油气运移模拟。模拟技术实质上就是一种定量恢复的方法，只要把不同时空的动态参数输入计算程序，就可以获得不同时间单元、不同空间位置的定量结果。可以说模拟技术是当前定量研究像油气运移这样复杂地质问题的唯一手段。

时的研究，即要确定运聚作用发生的时期及其随时间的变化。实际上只有定时才能真正定量，才能更准确地耦合各种地质作用。当前定时研究主要有同位素年龄测定、含烃包裹体各种古参数的测定以及油藏地球化学指标的对比等方法（图 1—2）。总之，要综合考虑各种非均质性、不同时空分布、定性、定量和定时等诸多问题。

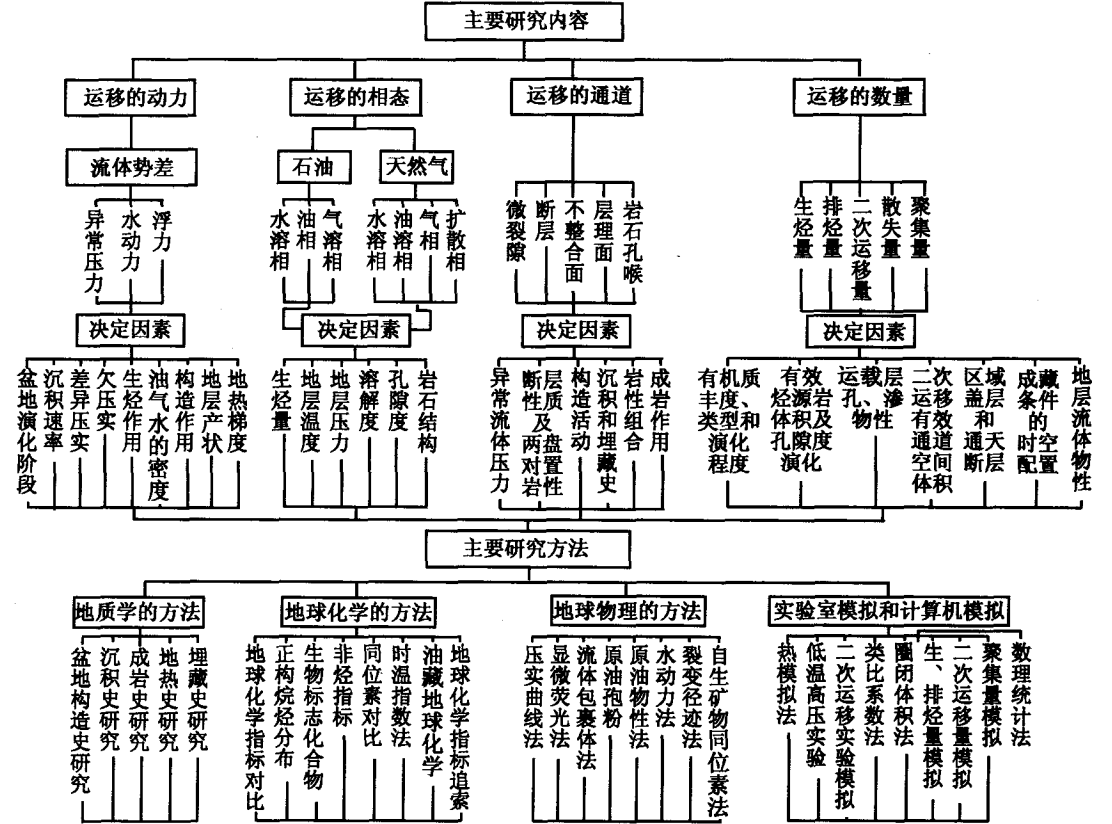


图 1—2 沉积盆地中的油气运移研究框图

应释放出来的热量以及在地壳变形过程中由机械能转化的热能。地温的高低主要决定于热流值、热导率和地层流体。

### 1. 热流值 (Thermal flux value)

热流值是指在一定时间内流经单位面积的热量,以  $\text{mW}/\text{m}^2$  为单位,过去常用  $\mu\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$  来度量 (即 HFU 单位),  $1\text{HFU} = 41.86\text{mW}/\text{m}^2$ 。在具放射性较多的花岗岩体或莫霍面 (Moho) 比较浅的地区,热流值一般比较高,全球沉积盆地平均热流值为  $60 \sim 70\text{mW}/\text{m}^2$ 。

### 2. 热导率 (Thermal conductivity)

热导率是指当温度差为  $1^\circ\text{C}$  时,每秒能透过厚  $1\text{cm}$ 、面积为  $1\text{cm}^2$  体积的热力,以  $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$  为单位,过去常用  $\text{mcal}/\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$  单位来度量 (即 TCU 单位),  $1\text{TCU} = 0.4186\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ 。

热传导主要有三种方式:①通过矿物颗粒和基质的传导;②通过孔隙流体的对流和平流;③热辐射。在同一地热源下岩石热导率小的地方地温高。

不同岩石的热导率变化相当大,并有以下几点规律:①结晶岩石的热导率比沉积岩高;②在常见的几种沉积岩中页岩的热导率最低;③蒸发岩的热导率高于其他所有沉积岩;④孔隙流体和孔隙填充物都是热的不良导体,因此孔隙性将大大降低岩石的热导率。

沉积盆地中地层剖面的平均热导率约为  $2.5 \sim 3\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ,其中:页岩约为  $1.5\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ,碳酸盐岩约为  $2 \sim 3\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ,砂岩约为  $3 \sim 4.5\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ,岩盐和石英约为  $5 \sim 7\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ,变质岩及岩浆岩一般则更高。大部分煤的热导率为  $0.25 \sim 1\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ 。低热导率的岩石成为地下热流的遮挡层,结果导致其下地温升高。尤其是地下深处具有高热导率岩层而上又有低热导率岩层覆盖的地区,地温会显著增高。例如,盐丘附近的地区就是这种情况。

### 3. 地下水流 (Underground flow)

这里主要指地层孔隙流体的流动。由于地层流体的热导率比较低,例如水的热导率约为  $0.56 \sim 0.68\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ 。所以当孔隙流体不流动时,地层热导率降低使地温增高。又由于水的热容量约为  $4200\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ ,比沉积岩平均的热容量大 3 倍以上,当其流动产生对流或平流时又会使地温降低。一般说来,泥质岩石孔隙度越大、含水越多,其热导率越低、地温也就越高,这是因为孔隙水难于流动;而砂质岩石中

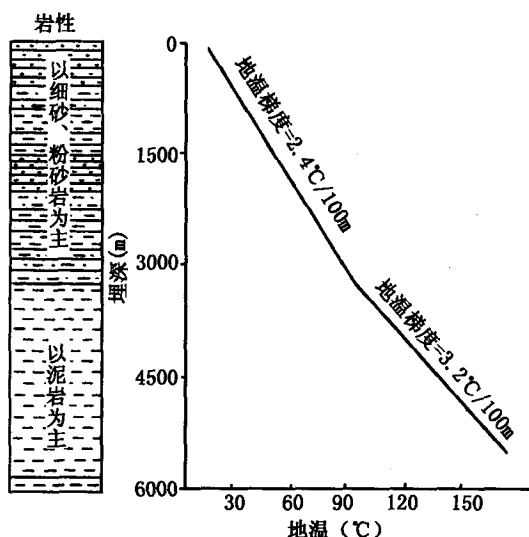


图 1—3 不同的岩性段具有不同的地温梯度

积剖面不同岩性的不同热导率，在岩性有显著变化的大套沉积岩系中，用这种方法求出的平均现地温梯度是不可靠的。实际上，是由于地层条件不同而造成剖面上不同深度有不同的地温梯度，因此在具体研究时应当分段求出地温梯度才比较准确（图 1—3）。例如，对松辽盆地白垩纪地层分段进行地温梯度测量后，发现白垩系的地温梯度有相间的两高两低特点（表 1—1），为油气的生成、迁移和聚集的研究提供了较准确的依据。

一般来说，地壳稳定地区的地温梯度比活动的造山带、边缘带为低。世界平均地温梯度为  $25^{\circ}\text{C}/\text{km}$  (Tissot, B. P. 等, 1978)。目前观察到的地温梯度最低可到  $5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ，如美国巴哈马地区某井（据 Levorsen, 1954）；最高可达  $90^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ，如印度尼西亚西伊里安

地区某井（Redmond 和 Koesoemadinta, 1976）。沉积盆地中的地温梯度一般变化在  $15\sim 50^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。我国东部含油气盆地的地温梯度一般在  $30\sim 48^{\circ}\text{C}/\text{km}$  之间，西部含油气盆地的地温梯度一般在  $18\sim 25^{\circ}\text{C}/\text{km}$  之间。

表 1—1 松辽盆地白垩纪地层地温梯度的变化

| 层 段                                      | 明水—四方台组 | 青山口—嫩江组 | 泉头组 | 登娄库组 |
|------------------------------------------|---------|---------|-----|------|
| 井数 (口)                                   | 17      | 59      | 26  | 5    |
| 平均梯度值 ( $^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ) | 2.7     | 4.4     | 3.1 | 3.7  |

据大庆石油管理局科学研究设计院, 1980。

### (三) 古地温 (Palaeogeotemperature) 及古地温梯度 (Palaeogeotemperature gradient)

古地温和古地温梯度是指某一地史时期的地温和地温梯度。在漫长的地质时期中，由于地壳升降、岩浆活动、地下流体等因素的变化，现地温和现地温梯度不能代表古地温和古地温梯度。因此，用现地温

地温梯度。使用这些方法的前提要求是，地层要连续沉积无明显的构造活动和岩浆活动，要有较多准确的与最大埋深（最高地温）对应的实测  $R$  值。此外，近年来发现地层流体异常高压有抑制  $R$  值的作用，这也是要注意的问题；由于在下古生代地层中，此时尚无镜质体，因而不能直接应用此方法。

## 2. 粘土矿物及其他自生矿物法

根据粘土矿物的相变与某些自生矿物（沸石、石英）的形成和温度间的关系具不可逆性，从而可以指示所经历过的最高温度。例如，青柳宏一和浅川忠（1984）确定了日本上第三系泥质岩中各种矿物转化的温度条件，从蒙脱石转换到伊利石—蒙脱石混层需要  $104^{\circ}\text{C}$ ；从混合层到伊利石则需要  $137^{\circ}\text{C}$ ；从火山玻璃到斜发沸石需要  $56^{\circ}\text{C}$ ；从斜发沸石到片沸石或方沸石的转换温度是  $116^{\circ}\text{C}$ ，再转化到浊沸石或钠长石则需要  $138^{\circ}\text{C}$ ；由非晶质硅转换成低温方石英只需  $45^{\circ}\text{C}$ ，再转化到低温石英需要  $69^{\circ}\text{C}$ 。如果平均古地表温度为  $15^{\circ}\text{C}$ ，就可以利用某种矿物在剖面上首次出现的深度求出古地温梯度。还可以利用现今地表与古沉积表面之间差距求得地层的剥蚀厚度（图 1—4）。

由于自生矿物具有随温度渐变的特征，而且还与其他许多诸如时间、压力、介质的酸碱度等物理、化学条件有关，而且粘土矿物的相变实际上是由量变到质变的过程，很难有一个明确的界限，因此这种方法只能对古地温进行粗略的研究。

## 3. 磷灰石裂变径迹法

磷灰石是含放射性较丰富的矿物，在其发生核裂变时由于各种粒子的高速流动，就会在矿物表面留下辐射伤痕即径迹。单位面积上的径迹数量即裂变径迹的密度且随时间延长而稳定增加。由于铀的衰变速度很稳定而矿物中的铀含量也不难求出，因此只要测出径迹密度就可求得矿物的同位素年龄。研究表明构造变动、孔隙流体以及风化作用对径迹几乎没有影响，唯独对温度十分敏感。温度升高径迹密度减少、径迹长度缩短直到完全消失，这一特性称为退火。通过对磷灰石加温实验，可以得知其退火带的温度范围为  $70\sim 125^{\circ}\text{C}$ 。在剖面上对应退火带的深度区间，就可以确定古地温和古地温梯度。如果剖面上退火带对应的古地温高于现地温，则说明地壳有隆升，由此也可以判断剥蚀厚度。可见磷灰石裂变径迹不仅可以测定矿物的生成年龄、古地温和古地温梯度，还可以判断地壳隆升和地温降低的速率。由于受磷灰石退火温度的限制，这种方法只适用低温热史（低于  $120^{\circ}\text{C}$ ）的研究，其中对降温热史的分析效果比较好。

## 4. 流体包裹体法

在成岩过程中，由于晶体不规则的生长捕获并封闭了很少量的流体介质，形成了流体包裹体。它常在石英、长石和方解石的次生加大边中见到，有单相、气—液两相以及含烃的包裹体。在常温、常压下往往是气—液两相包裹体，将其置于冷热台上升温加热使两相转化为

单相液体时的温度称为均一温度 (Homogenization temperature)。一般认为它代表了流体包裹体形成的最低温度, 经过压力校正才是真正的捕获时的温度, 但这只反映流体包裹体形成时的古地温。由于包裹体形成时期与宿主地层的时代往往不同, 因此只有利用多个古地温数据恢复出古地温梯度, 再根据地层古厚度和沉积速率才能对应求出包裹体形成的深度和时期。如果是含烃包裹体就可以肯定在该时期发生过油气运移。虽然流体包裹体记录了许多有关地温和油气运移的宝贵信息, 但要真实地提取这些信息在取样、测试和有关参数求取的过程中还有许多不易确定的因素。

众所周知, 温度是有机质转化成烃类最主要的化学动力。根据干酪根热降解晚期成油的理论, 现在多数人相信石油主要是在  $60\sim 150^{\circ}\text{C}$  温度范围内生成的, 这个范围在沉积层系中的位置取决于地温梯度。在地温梯度高的地区, 石油窗的位置浅而窄; 在地温梯度低的地区, 则深而宽。若按地温梯度为  $30^{\circ}\text{C}/\text{km}$  计算, 石油生成运移的深度大约在  $1500\sim 4500\text{m}$  的深度范围内。天然气则可以在更大的范围内生成和运移。若从目前世界上发现的最深油藏为  $6540\text{m}$  (美国墨西哥湾盆地的华盛顿湖油田) 来看, 估计液态烃完全消失的最大深度为  $8\text{km}$ , 地层温度可高于  $200^{\circ}\text{C}$ 。世界上已知最深的气藏为  $8083\text{m}$  (美国西内盆地的米尔斯—兰奇气田), 由此推测气态烃消失的最大深度为  $12\text{km}$ , 地温可高达  $350^{\circ}\text{C}$ 。从目前已发现异常高压有抑制烃类裂解作用的情况看, 上述深度下限也许只是一种保守的提法。若考虑无机成因作用, 甲烷的生存下限为  $30\text{km}$  而最终完全消亡的极限约  $600\text{km}$  深 (Gold T, 1982)。显然, 我们不能完全受上述  $60\sim 150^{\circ}\text{C}$  的传统生烃温度所限制。因此, 可以从理论上和事实上预测和证明油气的深层勘探具有很大潜力, 尤其是天然气。

## 二、压力

压力 (Pressure) 是垂直作用在物体单位面积上的一种力。压力可以由重力、热力、惯性力等作用而产生。它可以存在于固体、液体、气体的内部或流体与固体、固体与固体的接触面上。由于压力总是垂直于作用面, 所以又常称为正压力。压力一词与物理学中的压强同义, 其国际单位是帕 (Pa), 地质学中常用 MPa ( $10^6\text{Pa}$ )。存在于液体和气体内部的力为流体压力 (Fluid pressure), 笔者简单地把存在于固体内部的力理解为应力 (Stress)。

应力是表示物体在外力作用下, 为保持和恢复其原来状态所产生的一种内力。外力增加这种内力也随之增加, 当外力超过一定限度时物体就会发生形变或破坏。可见应力就是作用于物体内部单位面积上的内力, 其单位与压力相同。

在石油地质学中, 流体压力主要是指岩石或地层孔隙中的流体压力。地层孔隙流体压力可以由静水压力、动水压力、浮力、毛细管压力、膨胀压力、渗透压力等地下多种压力组成。实测的地层压力往往就是上述各种压力的综合体现。在开放的地层体系中流体压力主要是反映静水压力。