

# 油气运移基础理论与油气勘探

李明诚

中国地质大学能源地质系, 北京 100083

**摘要:** 在非均质地层中, 烃类的扩散流和体积流可以同时存在并可相互转换. 扩散流有助于烃类从源岩中排出, 并通过流动方式的转变直接参与油气的聚集成藏. 在致密泥岩层中, 扩散流和体积流的计算流速分别为  $4\sim 18\text{ m/Ma}$  和  $3\sim 15\text{ m/Ma}$ , 几乎没有差别, 说明泥岩中的流动也可以用达西公式来表述. 虽然油气的浮力流和渗流都是地下多孔介质中的流动, 但油气在水中上浮不呈连续相流动. 因此不要求也不能用达西公式表述临界运移饱和度和相对渗透率. 优势运移通道和有效运移空间是 2 个不同的概念, 前者是指油气运移的主要方向, 后者是指地层中真正发生了油气运移的空间. 大约有 70% 的油气藏位于优势运移通道上, 而在运载层中有效运移通道空间约占总孔隙空间的 5%~10%. 圈闭的封盖强度与闭合度有 3 种不同的组合类型, 它们是世界上油气分布的主控因素. 根据研究和统计, 世界石油储量的半衰期约为 29 Ma, 大油田的中值年龄约为 35 Ma. 根据烃类的微渗流流量计算, 中—大型油气藏的平均自然年龄约为 50~100 Ma.

**关键词:** 扩散流; 体积流; 优势运移通道; 有效运移空间; 封盖强度; 中值年龄.

中图分类号: P618.130

文章编号: 1000-2383(2004)04-0379-05

收稿日期: 2004-03-15

## Basic Principles of Migration and Hydrocarbon Exploration

LI Ming-cheng

Department of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

**Abstract:** Diffusive transport and volume flow of hydrocarbon may coexist and transform each other in the heterogeneous formation. Diffusive transport is helpful to hydrocarbon expulsion from source rock and directly contributes to oil and gas accumulation by transform of flow pattern. The calculated rates of the diffusive and volume flow in the tight mudstone, with the flow velocity of  $4\sim 18\text{ m/Ma}$  and  $3\sim 15\text{ m/Ma}$  respectively, show little difference, which indicates that Darcy's law is suitable for describing the flow behavior in the dense mudstone. Hydrocarbon migrates in the buoyancy-driven flow or the seepage flow through the subsurface porous media, but it moves upward in discontinuous phase in the course of buoyant ascent. Hence, the buoyant ascent does not relate with critical migration saturation and relative permeability, and can't obey the Darcy's law. Two concepts on hydrocarbon migration have been discussed, i. e. dominant migration pathway and effective migration space, the former implies main direction of hydrocarbon migration and the latter refers to the space in which the hydrocarbon migration really occurred. About 70% oil and gas reservoirs are situated in the dominant migration pathway, while the effective migration space occupies only about 5%~10% of total porous space in a carrier bed. There are three types of traps according to the different combinations of seal strength and trap closure, which are the key controlling factors on the distribution of oil and gas. On the basis of research and statistics, the half-life of petroleum reserve is inferred to be about 29 Ma, and the average age of a giant oil field is about 35 Ma. According to the calculated results of hydrocarbon microseepage fluxes, the average natural age of a median-giant oil and gas field is thought to be about 50~100 Ma.

**Key words:** diffusive transport; volume flow; dominant migration pathway; effective migration space; seal strength; average age.

20 世纪 90 年代以来, 油气运移的研究特别是在定量、定时方面取得了很大的进展(李明诚,

基金项目: 石油大学石油天然气成藏机理教育部重点实验室项目.

作者简介: 李明诚(1935-), 男, 教授, 从事石油地质油气运移研究.

2000). 这些成果可初步概括为: 在一次沉降的生烃盆地中, 油气生成、运移和聚集是一个带幕式特征的、连续的分异过程(李明诚, 2002); 该过程可以在 20~30 Ma 中完成; 一个油气藏可以在 1~10 Ma 中形成, 在地质上可视为瞬时(Welte, 1997). 本文仅就几个与油气勘探有关的基础理论问题阐述如下.

## 1 扩散流与体积流

### 1.1 判别

烃类在地层中运移是以烃浓度差为驱动力的单分子的扩散流为主, 还是以势差为驱动力的具相态的体积流为主, 目前主要依据佩克莱特数(Peclet number)来判别(Mackenzie *et al.*, 1988):

$$N_{pe} = \frac{VL}{D}$$

式中,  $N_{pe}$ . 佩克莱特数(无量纲);  $V$ . 达西流速(m/s);  $L$ . 距离或厚度(m);  $D$ . 扩散系数( $m^2/s$ ). 当  $N_{pe} < 0.1$  时, 以扩散流为主;  $N_{pe} > 1$  时, 以体积流为主.

### 1.2 初次运移中的扩散流与体积流

在一层厚 10 m 的泥质烃源岩中,  $N_{pe}$  数在  $10^{-4} \sim 10^3$  之间, 说明这 2 种流动可以同时存在, 并可相互过渡转换. 因此目前初次运移的研究中, 有更多的学者提出扩散-渗流的排烃模式, 认为: 在烃源岩的微孔中烃类很难进行具有相态的多分子体积流, 最初只能在浓度梯度驱动下, 从微孔中单分子扩散到较大孔隙中; 之后才能在剩余压力驱动下沿较大的孔隙和裂隙以体积流方式排出进入相邻运载层. 煤层气的采出就是这 2 种流动相互转换最直接的证据. 该过程先是对煤层减压脱附, 使甲烷分子脱离煤表面进入微孔(10~100 nm), 此时甲烷在浓度差作用下扩散到煤的大孔隙和割理( $> 1 \mu m$ )中, 之

后甲烷才能在压差驱动下以游离相的体积流采出(图 1)(骆祖江, 1997).

在一般的渗透性地层中, 虽然扩散流与体积流(达西流)的速率可以相差 3~4 个数量级. 但在孔隙度为 1%、渗透率为  $1 \times 10^{-12} \mu m^2$ 、扩散系数为  $1 \times 10 m^2/s$  的泥质地层中, 当流体粘度为  $10^{-3} Pa \cdot s$ 、压力梯度为 1 kPa/m 时, 扩散流的速率为 4~18 m/Ma, 达西流的速率为 3~15 m/Ma(Welte, 1997). 尽管用费克定理和达西定理分别进行上述计算还有不确定因素, 计算结果也会有出入, 但仍可说明在非常致密的地层中 2 种流动的速率相差不大, 由此看来在致密泥岩中的流动也可以用达西公式来表述.

### 1.3 二次运移中的扩散流与体积流

在砂泥岩组成的运载层系中, 当烃类遇到致密的泥质岩时以扩散流方式运移, 而在孔渗较好的砂质岩中以体积流方式运移, 即烃类能以不同的流动方式通过致密程度不同的岩石. 因此不能把二次运移过程中的分子扩散只看成是一种使烃类分散的消极因素, 还要看到扩散流可以转换成体积流而直接参与油气的聚集成藏(图 2)(Cokvob, 1959). 只有圈闭成藏后通过盖层的扩散流主要表现为油气的散失.

## 2 渗流与浮力流

这 2 种流动都属于具相态的体积流动, 也都是在地层孔隙介质中的流动, 但笔者认为它们之间还有很大的不同, 不能一概而论.

### 2.1 渗流

众所周知, 渗流是在流体势差作用下的一种流动, 可以分为单相渗流和多相渗流, 油气在地层中的运移主要是多相渗流(油-水、气-水两相或油-

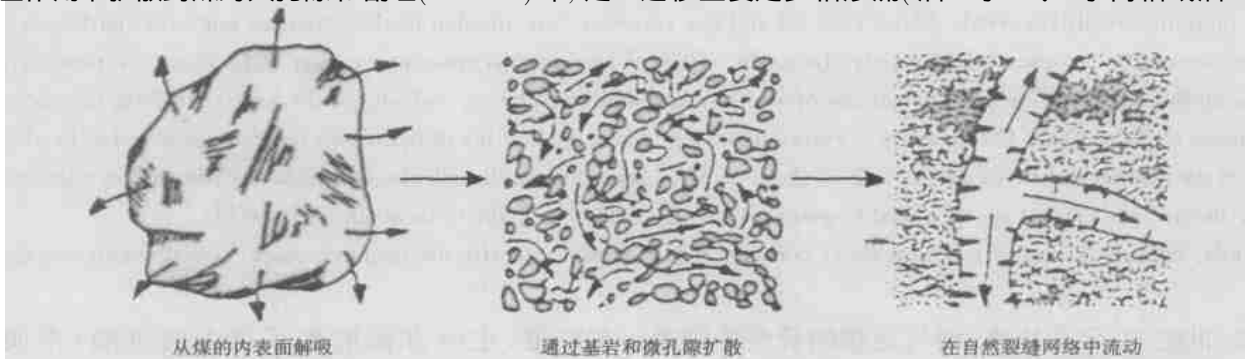


图 1 煤层气的采出是扩散流与体积流相互转换的过程(骆祖江, 1997)

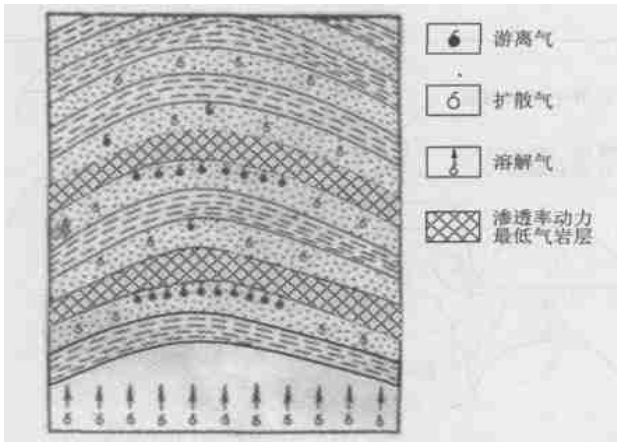


图 2 在垂向扩散条件下天然气的聚集 (Cokvob, 1959)

Fig.2 Natural gas accumulation in vertical diffusive condition (Cokvob, 1959)

气-水三相渗流), 其中某一相要呈连续状流动必要求一定的饱和度和相渗透率, 并可用流体势和达西公式来研究和定量计算。

### 2.2 浮力流

浮力流是油气在烃-水密度差作用下的一种流动, 是烃类在地层中进行二次运移最基本的流动方式, 特别是在静水条件下就更显得重要. 笔者把地下的浮力流分为自由上浮和限制性上浮 2 类(图 3) (李明诚, 2002), 前者是微烃滴( $< 1 \mu\text{m}$ ) 可以不受毛细管阻力直接沿较大的裂缝或连通孔隙自由上浮, 目前已证明它是普遍存在的一种流动(Cokvob, 1959; Price, 1995); 后者是传统意义上的浮力流, 即

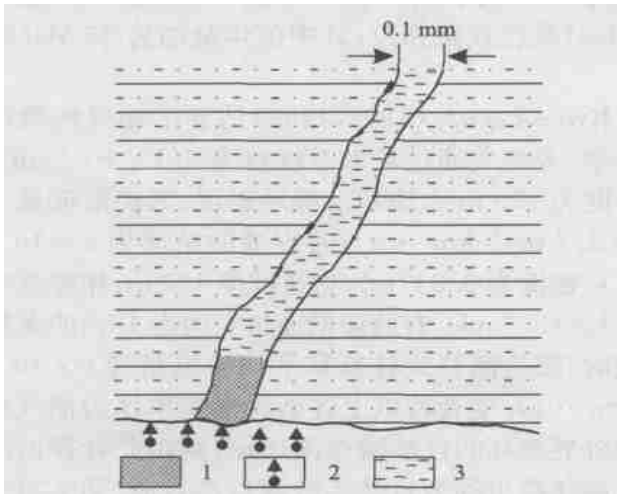


图 3 微烃滴沿裂缝和较大孔隙自由上浮 (李明诚, 2002)

Fig. 3 Free buoyant ascent of micro hydrocarbon through fissure and bigger pore (Li, 2002)

1. 裂缝的胶结部分; 2. 油珠气泡; 3. 水

需要积蓄一定的烃柱高度才能克服地层孔喉的毛细管阻力而上浮. 无论是哪一种上浮都呈断续状流动, 因此不要求含烃饱和度和相渗透率, 也不能像渗流那样用达西公式表述和计算, 从而给二次运移的定量研究带来了困难。

## 3 优势运移通道与有效运移空间

### 3.1 优势运移通道

优势通道是指油气在地下运移的主要方向. 它是依据流体在地层中总是沿最小功方向运移的自然法则而提出的. 流体运移做最小功的方向就是垂直其构造等高线的方向. 因此, 优势运移通道主要受地层构造形态控制, 垂直于构造等高线的流线可以汇聚, 也可以发散, 而流线汇聚的方向即成为优势运移通道方向, 对断层来说也大体如此 (Hindle, 1997). 当地层非均质性很强时, 油气主要沿孔渗性相对较好的部位运移, 此时沉积岩相的分布则是控制优势通道的主要因素. 例如致密层系中的砂质夹层、泥质岩中的粉砂质条带以及上下叠置相互连通的砂岩透镜体等等. 从目前研究来看约有 70% 的油气藏位于优势通道方向上 (Pratsch, 1997). 因此追溯优势运移通道就成为进行油气勘探的重要策略。

### 3.2 有效运移空间

笔者把运载层中真正发生了运移作用的空间称为有效运移空间 (李明诚, 1995), 与优势运移通道是 2 个不同的概念. 它主要是受岩石的结构控制, 即油气总是沿地层中孔渗性最好的部位运移. 油气无论是在优势通道方向上, 还是在非优势通道方向上运移, 都只是在该方向最容易通过的那部分空间中运移. 有效运移空间系数 (即与总孔隙空间的百分比) 的大小主要取决于岩石的结构。

Matthews (1996) 把泥岩的连通孔喉按孔径大小划分为 5 个数量级: 1 ~ 10 nm, (1). 10 ~ 100 nm, (2). 100 nm ~ 1  $\mu\text{m}$ , (3). 1 ~ 10  $\mu\text{m}$ , (4). 10 ~ 100  $\mu\text{m}$ , (5). 泥质岩主要由 (1)、(2) 类孔喉组成的约占 90% 以上, 余者主要是 (3) 类, 其中包括少许 (4) 和 (5) 类孔喉. 按此标准一般砂质岩中 (1)、(2) 类孔喉约占 50%, (3) 类约占 45%, (4) 和 (5) 类孔喉约占 5%. 从较大孔喉所占比例来看, 油气在岩石孔隙中的有效运移空间系数一般也就是在 5% ~ 10%, 与笔者多年来利用油气录井资料对我国东部很多凹陷的研究统计结果基本一致 (李明诚等, 1997). 例如大民屯凹陷

沙河街组运载层中的有效运移空间系数平均为 4.5%；歧口凹陷下第三系运载层中的有效运移空间系数平均为 7.3%。显然只有得知有效通道空间的大小，才能利用物质平衡的方法计算和模拟油气的聚集量，还可以分析二次运移发生的强度以及区域盖层可能分布的层位。

Sales (1997) 认为圈闭的封盖强度与闭合度的组合是决定世界油气分布的主控因素。根据两者的不同组合情况把圈闭划分为 3 种类型：I 类是封盖强度大于闭合度，超过闭合高度的油气只能从溢出点逸出做侧向运移；II 类是封盖强度小于闭合度，当圈闭尚未充满时油气就从顶部盖层渗漏向上做垂向运移；II 类是介于上述 2 类之间，它通过溢出点排出油，也可以通过顶部盖层漏失气 (图 4)。Gussow (1954) 提出的油气差异聚集的原理，实际上只是第 I 类圈闭的组合情况，并不能全面概括地下所有的圈闭组合类型。因此，在认识地下油气分布和指导油气勘探上都有局限性。

利用 Sales 提出的各类圈闭组合特征，可以较全面预测地下油气的分布并指导油气的勘探。例如，在钻井过程中发现有气显示，钻进圈闭后如果其中是油气共存，就可以说明它是 II 类圈闭，那么其中的油可沿溢出点侧向排出，在其上倾方向的圈闭可能含油，而圈闭中的油气可能来自下倾方向的 I 类圈闭，也可能来自深部的 II 类圈闭 (图 5)，从而给决策者提供了进一步勘探的思路。

由此可知，不同的油气显示结合不同的圈闭类型，可以给决策者提供不同的勘探思路。

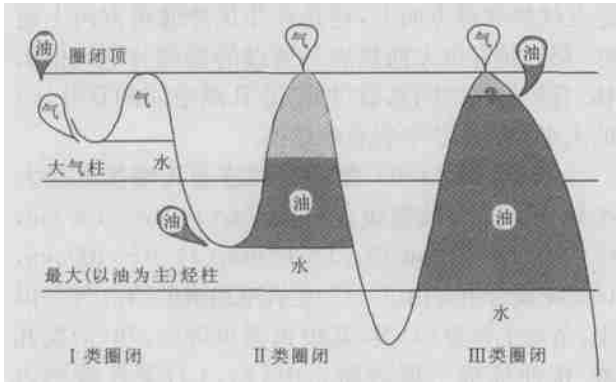


图 4 根据封盖强度与闭合度的不同组合把圈闭划分为 3 种类型 (Sales, 1997)

Fig. 4 3 types of traps according to different combinations of seal strength and trap closure (Sales, 1997)

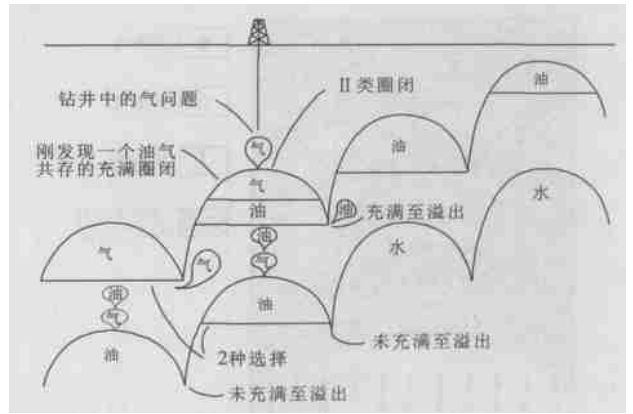


图 5 根据不同的圈闭类型预测地下的油气分布 (Sales, 1997)

Fig. 5 Oil and gas distribution according to different types of traps (Sales, 1997)

#### 4 油藏的中值年龄与自然年龄

Miller (1992) 提出石油储量随时间呈指数衰减的模式，即半衰期  $\times$  系统流量 =  $\ln 2 \times$  系统规模。其中：系统可以指全球范围、一个盆地或一个油藏；系统规模是指相应系统中石油的储量；系统流量是指相应系统中石油圈闭的渗漏量；半衰期可以理解为系统的中值年龄。据 Miller 研究全球石油圈闭的渗漏速率平均约为每年 80 万桶 (约 11.4 万 t)，以此计算全球石油储量的半衰期约为 29 Ma。

Macgregor (1996) 根据世界上 350 个大油田的时代分布，认为占世界 80% 以上的石油资源在距今 75 Ma 时就已成藏到位，其中值年龄约为 35 Ma (图 6)。

Krooss *et al.* (1992, 1996) 估算了油气的微渗漏速率：天然气通过扩散系统数为  $2.1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ，厚度为 390 m 水饱和的泥质盖层，其扩散流量平均为  $3.7 \text{ m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ；若石油的粘度为  $5 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 、密度为  $0.8 \text{ t/m}^3$ ，当通过厚 150 m、相渗透率为  $0.1 \times 10^{-6} \text{ mD}$ 、有效渗漏通道空间占 10% 的泥质盖层时，按达西公式计算其平均渗流量为  $6 \times 10^{-3} \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。笔者若以上述微渗漏速率作为油气藏未遭外界破坏的自然微渗漏速率，则由此计算出的油气藏年龄可称为自然年龄或自然寿命。那么对于中型—大型油气藏来说，其自然年龄平均为 50 ~ 100 Ma。尽管对油气藏年龄的各种估算还可能有一定的出入，但仍可使人们更深刻地认识到晚期生烃和晚期成藏的重要性和优越性。

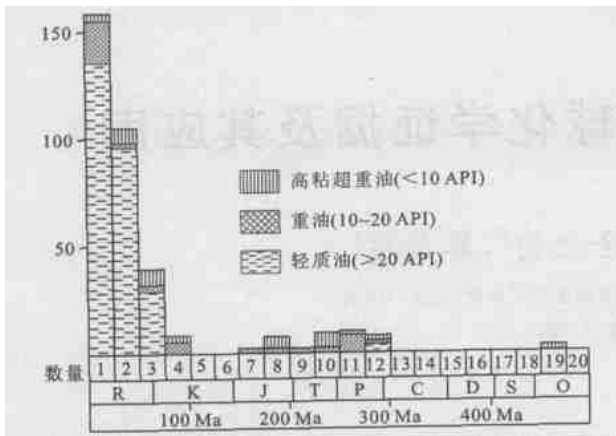


图6 大油田的数量与石油就位年龄的关系 (Macgregor, 1996)

Fig. 6 Relationship between the number of large-scale oil fields and petroleum insertion age (Macgregor, 1996)

## References

- Cokvob, B. A., 1959. Oil and gas migration. Translated by Zheng, H. A.. Science Press, Beijing, 50—109 (in Chinese).
- Hindle, A. D., 1997. Petroleum migration pathways and charge concentration; A three dimensional model. *AAPG Bulletin*, 81(9): 1451—1481.
- Krooss, B., Leythaeuser, D., 1996. Molecular diffusion of light hydrocarbons in sedimentary rocks and its role in the migration and dissipation of natural gas. *AAPG Memoir*, 66: 1973—1830.
- Krooss, B., Leythaeuser, D., Schaefer, R. G., 1992. The quantification of diffusive hydrocarbon losses the rough cap rocks of natural gas reservoirs—A reevaluation. *AAPG Bulletin*, 76: 403—406.
- Li, M. C., 2000. An overview of hydrocarbon migration research. *Petroleum Exploration and Development*, 27(4): 3—10 (in Chinese with English abstract).
- Li, M. C., 2002. Reconsideration on some concepts in research of hydrocarbon migration and accumulation. *Petroleum Exploration and Development*, 29(2): 13—16 (in Chinese with English abstract).
- Li, M. C., Li, W., 1995. A study of simulation of hydrocarbons accumulation quantity. *Petroleum Exploration and Development*, 22(6): 36—39 (in Chinese with English abstract).
- Li, M. C., Li, W., Cai, F., et al., 1997. Integrative study of preservation conditions of oil and gas pools. *Acta Petrolei Sinica*, 18(2): 41—47.
- Luo, Z. J., Yang, X. L., 1997. Coalbed methane reservoir numerical simulation. *Coal Geology & Exploration*, (2): 28—30 (in Chinese with English abstract).
- Macgregor, D. S., 1996. Factors controlling the destruction or preservation of giant light oil field. *Petroleum Geoscience*, (2): 197—217.
- Mackenzie, A. S., Leythaeuser, D., Muller, P., et al., 1988. The movement of hydrocarbons in shales. *Nature*, 331: 63—65.
- Matthews, M. D., 1996. Migration—A view from the top. *AAPG Memoir*, 66: 139—155.
- Miller, R. G., 2000. Estimation of global petroleum resources and their exploitation time. Translated by Feng, L.. *Science and Technology Development in Petroleum Geology*, (4): 19—34 (in Chinese with English abstract).
- Pratsch, J. C., 1997. Determination of exploration by migration pathways of oil and gas. Translated by Song, M. Y.. *Foreign Oil and Gas Exploration*, 9(1): 63—68 (in Chinese with English abstract).
- Price, L. C., 1995. A critical overview and proposed working model of surface geochemical exploration. In: *Unconventional methods in exploration for petroleum and natural gas (IV)*. 245—285.
- Sales, J. K., 1997. Seal strength vs. trap closure—A fundamental control on the distribution of oil and gas. *AAPG Memoir*, 67: 57—83.
- Welte, D. H., 1997. *Petroleum and basin evolution*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 451—461, 422—427.

## 附中文参考文献

- Cokvob, B. A., 1959. 油气运移. 郑厚安, 译. 北京: 科学出版社, 50—109.
- 李明诚, 2000. 石油与天然气运移研究综述. 石油勘探与开发, 27(4): 3—10.
- 李明诚, 2002. 对油气运移研究中一些概念的再思考. 石油勘探与开发, 29(2): 13—16.
- 李明诚, 1995. 油气聚集量模拟的研究. 石油勘探与开发, 22(6): 36—39.
- 李明诚, 1997. 油气成藏保存条件的综合研究. 石油学报, (2): 41—47.
- 骆祖江, 1997. 煤层甲烷气藏数值模拟. 煤田地质与勘探, 2: 28—30.
- Miller, R. G., 2000. 全球石油资源及其利用期限的估算. 冯力, 译. 石油地质科技动态, (4): 19—34.
- Pratsch, J. C., 1997. 根据油气运移路径确定勘探策略. 宋明雁, 译. 国外油气勘探, 9(1): 63—68.