

热力作用下石油流体运移的能量方程

邱楠生^{1,2}, 方家虎³

1. 石油大学石油与天然气成藏机理教育部重点实验室, 北京 102249

2. 石油大学盆地与油藏研究中心, 北京 102249

3. 中国矿业大学资源系, 北京 100083

摘要: 为了探讨油气运移成藏机制, 从热力学角度论证了热可以作为油运移的动力, 并根据模拟实验结果首次建立热力系条件下热作为流体运移动力时流体流动的能量方程, 研究了流体在热力作用下焓的变化情况. 在模拟实验中油运移的速度和距离取决于油(流体)从外界吸收的热量及焓. 由此, 有可能对热作为石油流体输运动力进行半定量—定量研究. 同时, 结合实际例子探讨了热力学系统中流体运动的热力学关系, 认为热作为流体运输的动力在实际盆地中比较复杂. 如果从单一因素(热)来考虑流体运移动力, 则取决于热的大小和输导层的物性、产状等.

关键词: 热力作用; 石油运移; 能量方程; 焓.

中图分类号: P618.130

文章编号: 1000-2383(2004)04-0427-06

收稿日期: 2004-03-19

Energy Formula for Oil Migration in Thermodynamic System

QIU Nan-sheng^{1,2}, FANG Jia-hu³

1. Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation Mechanism, University of Petroleum, Ministry of Education, Beijing 102249, China

2. Basin and Reservoir Research Center, University of Petroleum, Beijing 102249, China

3. Department of Resources, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China

Abstract: This paper discusses that heat can act as the driven force of oil migration in the point of view of thermodynamics. The energy formula for oil migration, that heat acts as the driven force of fluid movement, was established in the thermodynamic system based on the experimental results. The variation of enthalpy in the fluid flow indicates that heat and its enthalpy control the migration velocity and distance of oil flow. The enthalpy decreases with the increase of migration distance. The paper also discusses the dynamics of oil movement in semi-quantitative to quantitatively. At the same time, thermodynamic relation of fluid flow within the thermodynamic system is applied to the practical carriers, the results indicate that heat regime taking as the driven force shows more complicated patterns in practical basins. The distance of oil migration depends on the amount of heat and physical characteristics of carriers.

Key words: thermodynamics; oil migration; energy formula; enthalpy.

对于沉积盆地深部热动力作用问题及其对油气运聚的作用, 目前国内外比较多的是关于深盆气方面的理论(Gies, 1984; 袁政文, 1996; Kuuskraa, 1996; 金之钧和张金川, 1999), 对于油的运聚成藏机制还不十分清楚. 传统石油地质学所进行的油气二次运移和聚集的模拟实验(Demhichi and Anderson, 1989; Catalan *et al.*, 1992; Thomas and

Clouse, 1995; 曾溅辉和王洪玉, 1999; 康永尚等, 2002)也都没有涉及到热作为动力的问题.

根据我们的模拟实验, 认为在深部地质条件下温度(热)有可能成为石油流体运移的主要动力. 但对于温度是如何对流体的运移起作用的认识不一. 热对流无疑是烃类运移的重要形式, 它可以在很短的地质时间内使大量的烃类以溶解状态运移到圈闭

中. 沉积盆地油气储集体中沸腾包裹体的发现, 证实了地下油气流体在热力作用下对流运移形式的存在 (Hu *et al.*, 1999; 邱楠生等, 1999; 邱楠生等, 2000; 邱楠生和金之钧, 2000). 那么, 如何定量描述热作为地质流体运移和聚集的动力? 温度/热动力与石油运输的量有何联系? 本文主要根据物理模拟实验结果, 建立热力作用下石油流体运移的能量方程, 对热作为流体运移动力进行量化的探讨.

1 油运移的热力系

热力学系统(简称热力系)是指在对一个过程进行分析时从若干物体中取出需要研究的部分, 也可称为由界面包围的作为研究对象的物体的总和. 一般情况下, 热力系与外界处于相互作用中, 彼此可交换能量及物质. 根据热力系与外界进行物质交换的情况, 热力系可分为开系和闭系. 所谓的开口系统(开系)是指与外界有物质交换的热力学系, 而闭系则是指与外界无物质交换的热力学系. 热力系中物质的密度、比容、压力和温度等是其基本状态参数.

1.1 石油运移的热力学模型

石油流体在地下输导体中的运移可以看成是一个热力学系统, 其中流体运动的能量方程符合热力学定律. 图 1 是简化的油在储集体中运移的情况, 为具有一定倾角的输导层体系. 如果我们取输导体其中的一个单元(也叫微元体, 图中虚线围成的空间)作为研究对象, 对于输导体热力系而言, 它是一个开

口热力系; 而对于上述微元体以外的整个输导层系统而言(图 1 中实线围成的空间部分), 是一个具有一定控制质量的闭口热力系统.

假定在 t 时刻微元体(开系中)具有质量 m_t 、能量 E_t 的流体, 在 Δt 时间内有质量 Δm_{in} 的物质进入该系统, 有质量 Δm_{out} 的物质移出该系统. 那么, 所研究的开系在 $t + \Delta t$ 时刻流体具有的质量为 $m_{t+\Delta t}$ 、能量为 $E_{t+\Delta t}$. 在 t 时刻闭系的能量为 $E_t + e_{in} \Delta m_{in}$, 在 $t + \Delta t$ 时刻, 闭系的能量为 $E_{t+\Delta t} + e_{out} \Delta m_{out}$. 同时, 假定进出流体的比储能分别为 e_{in} 和 e_{out} , 在 Δt 时间内系统从外界吸入的热量为 ΔQ , 输出净功为 ΔW_{net} , 那么, 由热力学第一定律建立的有关流体运动的能量和焓的方程式可应用于我们的研究中.

1.2 热力系统中流体运动的一般能量方程

图 1 中在时间间隔 Δt 内, 该闭系的储存能的变化量为:

$$dE = (E_{t+\Delta t} + e_{out} \Delta m_{out}) - (E_t + e_{in} \Delta m_{in}) = (E_{t+\Delta t} - E_t) + (e_{out} \Delta m_{out} - e_{in} \Delta m_{in}) = dE_{c,v} + (e_{out} \Delta m_{out} - e_{in} \Delta m_{in}) \quad (1)$$

质量为 Δm_{in} 和 Δm_{out} 的物质在进出开系时系统付出的流动功为:

$$\Delta W_f = P_{out} \cdot V_{out} \cdot \Delta m_{out} - P_{in} \cdot V_{in} \cdot \Delta m_{in} \quad (2)$$

这样, 对于所考虑的闭口系统而言, 在时间间隔 Δt 内完成的总功量为系统输出的净功(ΔW_{net})与物质进出开系时系统付出的流动功之和, 即:

$$\Delta W = \Delta W_{net} + \Delta W_f = \Delta W_{net} + P_{out} V_{out} \Delta m_{out} - P_{in} V_{in} \Delta m_{in} \sum m_{out} = \sum m_{in} \quad (3)$$

对于所取的闭系, 在 Δt 时间内能量的变化为储存能的变化量(dE)与总功量之和, 即能量方程式为:

$$\Delta Q = dE + \Delta W = dE_{c,v} + (e_{out} \Delta m_{out} - e_{in} \Delta m_{in}) + (P_{out} \cdot V_{out} \cdot \Delta m_{out} - P_{in} \cdot V_{in} \cdot \Delta m_{in}) + \Delta W_{net} \quad (4)$$

上式表示的是单位质量的流体的情况, 如果考虑整个进出系统的流体, 则闭系的能量方程为:

$$\Delta Q = dE_{c,v} + \sum \Delta m_{out} (e + PV)_{out} - \sum \Delta m_{in} (e + PV)_{in} + \Delta W_{net} \quad (5)$$

在 e 中包含热力状态参数 u (称为比内能), 而 PV 也是热力状态参数. 为方便, 可将二者组合在一起, 即:

$$h = u + PV, \quad (6)$$

$$\text{或} \quad H = U + PV \quad (7)$$

(6)和(7)式中, h 和 H 分别为比焓和焓, U 为内能. H 为物质进出该系统时带入或带出的内能与推挤

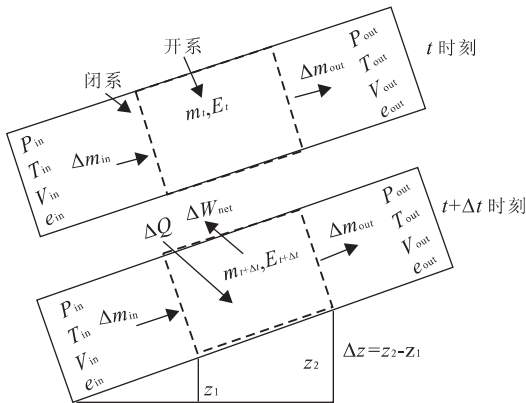


图 1 输导体中油运移的系统能量变化示意图

Fig. 1 Sketch of energy variation during oil migration system in the reservoir

图中 P_{in} 、 T_{in} 、 V_{in} 、 e_{in} 、 P_{out} 、 T_{out} 、 V_{out} 和 e_{out} 等为流体进出系统的基本状态参数, Z_1 、 Z_2 代表高程

功之和,是随物质一起转移的能量.这样,(5)式就可以写为:

$$\Delta Q = dE_{c,v} + \sum \Delta m_{out} (h + v^2/2 + gz)_{out} - \sum \Delta m_{in} (h + v^2/2 + gz)_{in} + \Delta W_{net} \quad (8)$$

该式即为开系的能量方程,它反映了开系与外界交换的热、功,由于质量迁移引起的能量迁移以及本身储存能的变化之间的关系.将上式除以 Δt ,得到:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{dE_{c,v}}{\Delta t} + \sum \frac{\Delta m_{out}}{\Delta t} (h + \frac{v^2}{2} + gz)_{out} - \sum \frac{\Delta m_{in}}{\Delta t} (h + \frac{v^2}{2} + gz)_{in} + \frac{\Delta W_{net}}{\Delta t} \quad (9)$$

当 Δt 足够小时,上式可写为用流率形式表达的开系的能量方程式:

$$Q = \frac{dE_{c,v}}{\Delta t} + \sum m_{out} (h + \frac{v^2}{2} + gz)_{out} - \sum m_{in} (h + \frac{v^2}{2} + gz)_{in} + W_{net} \quad (10)$$

式中, v 为流体的运动速度(m/s), z 为高度(m), g 为重力加速度, gz 为比重力位能(J/kg), $v^2/2$ 为比宏观动能(J/kg).在稳态下,系统内各点流体的热力状态和流动情况不随时间变化.将实际流动过程近似为稳态过程可使问题简单化.因此,在稳态下,

$$\frac{dE_{c,v}}{\Delta t} = 0, \quad \sum m_{out} = \sum m_{in}$$

考虑单股流体时,有 $m_{in} = m_{out} = m$,用 m 除以(10)式,并令 $q = \frac{Q}{m}, W_{net} = \frac{W_{net}}{m}$,

$$则有: q = \Delta h + \frac{1}{2} \Delta v^2 + g \Delta z + W_{net} \quad (11)$$

$$写成微分形式: dq = dh + \frac{1}{2} dv^2 + g dz + dW_{net} \quad (12)$$

该式即为流过开系的单位质量流体在由进口到出口所经历的过程中,从外界吸入的热量.当流体的质量为 m 时,稳态流动能量方程可写为:

$$Q = \Delta H + \frac{1}{2} m \Delta v^2 + mg \Delta z + W_{net} \quad (13)$$

上式说明流体在流过开系的过程中,从外界吸入的热量与流体的焓、流体的流速、流体运移中的重力位能差、流体运移过程中的净功有关,可用作研究油在热力作用下运移的能量方程.上式后3项属于机械能的范畴.油(流体)在运移过程中从外界吸入的热量决定了油的焓、油的流速及运移过程中的重力位能差和油运移中的净功.

2 模拟实验条件下油流体运动的能量方程

根据所进行的模拟实验,在温度差的作用下油可以运移,且运移的速度和距离取决于温度差的大小和时间(邱楠生和方家虎,2003).我们结合所进行的物理模拟实验结果和热力学的有关定律,可以建立该热力系统中流体运动的能量方程,定量研究热力作用下油流体的运移特征,从而为实际盆地地质条件下油气成藏动力学研究提供参考.

为了简化实际盆地的复杂性,将输导体中油的运移过程看成是一个稳态的热力系.至于油在运移过程中的相态、运移路径和运移方式(缓慢还是脉动式)等,在我们研究的热力系中不作考虑.同时,对于边界上存在的液体表面力做功的现象也不考虑.我们所建立和研究的热力系只考虑温度(热)的作用.由于油在模拟装置中无净功输入或输出, $W_{net} = 0$;同时,在模拟实验中由于玻璃管水平放置(图1中 $z_1 = z_2$),消除浮力作用和重力位能差的影响,即, $mg \Delta z = 0$;这样,本项目的模拟实验装置将对于热力系中油运移的能量方程就可简化为:

$$Q = \Delta H + \frac{1}{2} m \Delta v^2 \quad (14)$$

因此,从热力学角度也证实了热可以作为油运移的动力.在模拟实验中油运移的速度(距离)取决于油(流体)从外界吸收的热量及焓.如果油运移过程中的推挤功(PV)可以忽略不计的话,式(7)中焓的变化取决于油的内能的变化,即 $H = U$.事实上,油的内能以及其从外界吸收的热量均取决于模拟实验中的温度差.因此,它们都是温度差的函数.建立这种函数可以研究油在温度差作用下运移的距离.

用比热量(q)来表示,则式(14)又可写成:

$$q = \Delta h + \frac{1}{2} v^2 \quad (15)$$

q 表示流过开系的单位质量流体在由进口到出口所经历的过程中,从外界吸入的热量(J/kg),它与物质的比热容和温度有关,可写为:

$$q = c \times dT, \quad (16)$$

dT 为开系温度与 T_2 温度之差.在玻璃管内如果认为温度从 T_1 端到 T_2 端的变化是线性变化的话,假设所考察的开系位于距离 T_1 端的 x 的地方.则任一点(x)上的温度为(图2):

$$T(x) = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{L} x$$

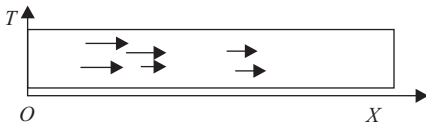


图 2 流体转移速度方程示意图

Fig. 2 Sketch of fluid flow coordinate

$$dT = T(x) - T_2 = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{L}x - T_2 = \Delta T(1 - \frac{x}{L}) \quad (17)$$

上式中, $\Delta T = T_1 - T_2$, L 是模拟装置中玻璃管实际的长度, 在本实验模型中为 50 cm, 将式(16)和(17)代入式(15), 可以得到:

$$c \times \Delta T(1 - \frac{x}{L}) = \Delta h + \frac{1}{2}v^2 \quad (18)$$

式中, c 为油的不同温度下的比热容; ΔT 为模拟实验的温度差($^{\circ}\text{C}$); x 为玻璃管上任一点离“油源”区的距离(cm); Δh 为比焓(kJ/kg); v 为油在某一时刻的转移速度(m/s). 根据模拟实验的结果, 由上式即可以得到不同温度(差)条件下油的比焓.

油在某一实验条件下任一时刻的转移速度可以通过对转移距离—时间曲线的微分得到. 油在某一时刻(t)的转移速度为:

$$v = dx/dt \quad (19)$$

图 3 是根据模拟实验 I 得到的转移距离—时间曲线, 这里仅考虑从实验开始到油停止转移的时间. 根据模拟实验 I 中实验条件($\Delta T = 30^{\circ}\text{C}$, $T_1 = 50^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 20^{\circ}\text{C}$, 干砂, $d = 0.15\text{ mm}$) 得到的转移距离和时间的回归方程为:

$$x = 5.0798 t^{0.2518}, \quad t < 90 \text{ h} \quad (20)$$

对上式进行微分, 即可得到该条件下油转移的速度:

$$v = dx/dt = 0.2518 \times 5.0798 t^{-0.7482} = 1.2791 t^{-0.7482}, \quad t < 90 \text{ h} \quad (21)$$

根据上式, 即可以计算不同时刻油的转移速度. 例如, 在模拟实验进行到 50 h 时, 油的转移速度为 $1.90 \times 10^{-7} \text{ m/s}$. 图 4a 是该条件下的转移速度随时间变化的曲线.

同样, 根据模拟实验 II 中实验条件($\Delta T = 50^{\circ}\text{C}$, $T_1 = 70^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 20^{\circ}\text{C}$, 饱和水, $d = 0.15\text{ mm}$) 得到的转移距离和时间的回归方程:

$$x = 0.6876 t^{0.3516}, \quad t < 224 \text{ h} \quad (22)$$

对式(21)进行微分, 也可以得到该条件下的转移速度(图 4b):

$$v = dx/dt = 0.2418 t^{-0.6484}, \quad t < 224 \text{ h} \quad (23)$$

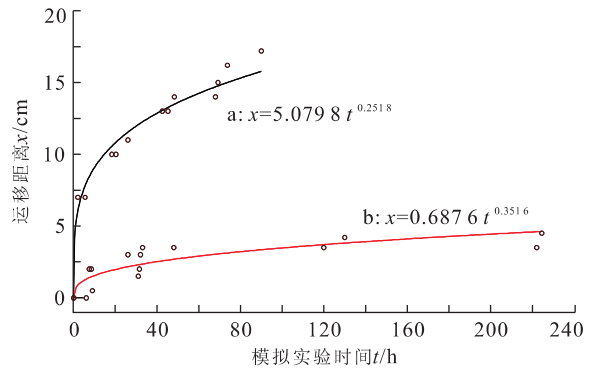


图 3 根据模拟实验得到的转移距离—时间关系曲线

Fig. 3 Relationship between migration distance and time from modeling results

a. 实验条件为: $T_1 = 50^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 20^{\circ}\text{C}$ ($\Delta T = 30^{\circ}\text{C}$), 干砂, $d = 0.15\text{ mm}$; b. 实验条件为: $T_1 = 70^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 20^{\circ}\text{C}$ ($\Delta T = 50^{\circ}\text{C}$), 饱和水, $d = 0.15\text{ mm}$

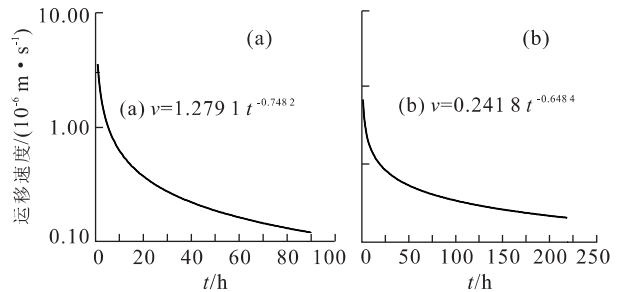


图 4 根据方程(21)和(23)得到的转移速度和时间的关系

Fig. 4 Migration velocity obtained from experiment model I and II

式(18)也是油转移距离(速度)和温度差、油的焓之间的线性关系式. 通过模拟实验得到不同温度差及其不同的转移距离, 可以得到油在不同温度情况下的比焓. 在我们进行的模拟实验过程中, 由于油转移的速度很小($< 10^{-6} \text{ m/s}$), 相对于 v, v^2 可以忽略不计. 这样, 式(18)可以简化为:

$$\Delta h = c \times \Delta T(1 - \frac{1}{50}x) \quad (24)$$

上式给出了油转移到不同距离时, 其比焓(Δh)与油在该温度条件下的比热容、实验的温度差有关. 如在模拟实验 II 中实验($\Delta T = 70^{\circ}\text{C}$, $T_1 = 90^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 20^{\circ}\text{C}$, 饱和水, $d = 0.15\text{ mm}$) 的条件下, 利用式(24)计算得到在温度差为 70°C 时不同实验阶段油的比焓分别为:

$t = 1 \text{ h}$, $\Delta h = 604.15 \text{ kJ/kg}$, 此时油的温度降至 77.4°C ;

$t = 2 \text{ h}$, $\Delta h = 505.65 \text{ kJ/kg}$, 此时油的温度降至

69 °C;

$t=20$ h, $\Delta h=417.69$ kJ/kg, 此时油的温度降至 61.3 °C.

同样可以计算其他实验条件下的油流体的焓. 结果表明油的运移状况和焓、温度差有关系. 随着油逐渐向温度低一端的运移, 其温度逐渐降低, 流体的焓减小; 流体在运移过程中从外界吸入的热量决定了油的焓、油的流速及运移过程中的重力位能.

在实际沉积盆地的输导层油运移过程中, 往往输导层并非水平的. 因此, 必须考虑流体的重力位能差的影响. 这样, 流体流动的能量方程应用式(13)表示:

$$q = dh + \frac{1}{2}v^2 + gdz \quad (25)$$

这样, 结合输导层所处的温度状况及其物性特征和上述流体流动的能量方程, 可以初步对热力系统下热作为油在储集体中的运移动力进行分析. 结合式(16)和(18), 可以计算石油在运移到不同的距离(x)时的比焓:

$$dh = q - \frac{1}{2}v^2 - gdz = c \times \Delta T(1 - \frac{x}{L}) - \frac{1}{2}v^2 - gdz \quad (26)$$

若输导层的倾角为 α , 则 $dz = x \sin \alpha$. 由于运移速度很小, 可忽略不计, 则式(26)可写为

$$dh = c \times \Delta T - (\frac{c\Delta T}{L} + g \sin \alpha)x \quad (27)$$

由热力学第二定律, 流体发生运动必须满足

$$dh = c \times \Delta T - (\frac{c\Delta T}{L} + g \sin \alpha)x \geq 0 \quad (28)$$

即在热的作用下, 如果流体仅仅依靠热动力的作用进行运移, 其运移距离是有限的, 取决于模拟实验的热(温度差)和输导层的倾角.

作为对上述方程的讨论, 我们举一实际盆地输导层的例子. 设该输导层是一个倾斜的砂层, 其储集物性与本实验的相当. 砂层长度为 300 m, 底部埋藏深度为 3 500 m, 顶部埋藏深度为 3 450 m. 该区的地温梯度为 3.5 °C/100 m, 地表温度为 15 °C. 则输导层底部相应的温度为 137.5 °C, 顶部温度为 135.7 °C, $\Delta T=1.8$ °C. 同样认为石油在输运过程中无净功的输入或输出, 但由于存在重力位能, 因此其流体流动的能量方程用式(25)表示.

利用式(27)可以计算石油在运移到不同深度时的焓的变化. 油沿输导层向上运移 100 m 时, 其比焓由初始的 687.5 kJ/kg 减小至 295 kJ/kg. 根据式

(27), 当油运移到 175.15 m 时, 其比焓为零. 根据热力学第二定律和式(28), 在此温度状况下, 油不可能再继续往前运移. 即在热力系中由温度(热)作为动力的流体运移距离取决于热的大小.

3 结论和讨论

从热力学角度论证了热可以作为油运移的动力并利用模拟实验的结果建立了热力系条件下石油运移的能量方程, 在模拟实验中油运移的速度(距离)取决于油(流体)从外界吸收的热量及焓. 结合实际例子探讨了热力学系统中流体运动的热力学关系, 认为热作为流体输运的动力在实际盆地中比较复杂. 如果从单一因素(热)来考虑流体运移动力, 则取决于热的大小和输导层的物性、产状等.

但是, 上述分析仅仅是根据热作为流体运动的唯一动力来考虑的, 在模拟实验和模型的设计中可能比较简单, 在实际沉积盆地中的石油运移还受很多因素的作用, 在许多方面还有待于将来进一步的研究. 所建立的有关的运移热力学方程是初步的, 如何应用到实际盆地的地质条件是今后要做的一项艰巨的任务.

References

- Catalan, L., Fu, X. W., Chatzis, I., 1992. An experimental study of secondary oil migration. *AAPG*, 76: 638—650.
- Demhichi, H. J., Anderson, M. J., 1989. Secondary migration of oil experiments supporting efficient movement of separate, buoyant oil phase along limites conduit. *AAPG*, 73(8): 1018—1021.
- Gies, R. M., 1984. Case history for a major Alberta deep basin gas trap; The Cadomin Formation. *AAPG Memior*, 38.
- Hu, W. X., Jin, Z. J., Qiu, N. S., et al., 1999. Boiling process of low temperature formation water in petroleum system, Qaidam basin. *Chinese Science Bulletin*, 44 (Suppl.): 77—78.
- Jin, Z. J., Zhang, J. C., 1999. Exploration strategy for deep basin gas reservoir. *Petroleum Exploration and Development*, 26 (1): 4—5 (in Chinese with English abstract).
- Kuuskraa, V. A., 1996. Tight sands and gas as U. S. gas source. *Oil & Gas Journal*, 94(12): 102—107.
- Kang, Y. S., Zhu, J. C., Chen, L. M., 2002. Result of physical experiment on petroleum migration in water saturat-

ed fractured media and their geological significance. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(6): 736—740 (in Chinese with English abstract).

Qiu, N. S., Fang, J. H., 2003. Physical simulation for petroleum migration in thermodynamic system. *Oil and Gas Geology*, 24(3): 210—214 (in Chinese with English abstract).

Qiu, N. S., Jin, Z. J., 2000. Study on pulse entrapment of hydrocarbon accumulation. *Earth Science Frontiers*, 7(4): 561—567 (in Chinese with English abstract).

Qiu, N. S., Jin, Z. J., Hu, W. X., 2000. Study on the hydrocarbon charge history in Dongying depression by evidence from fluid inclusions. *Journal of University of Petroleum, China*, 24(4): 95—97 (in Chinese with English abstract).

Qiu, N. S., Kang, Y. S., Fan, H. H., et al., 1999. Temperature, pressure and reservoir distribution in Tertiary, western Qaidam basin. *Chinese Journal of Geophysics*, 42(6): 826—833 (in Chinese with English abstract).

Thomas, M. M., Clouse, J. A., 1995. Scaled physical model of secondary oil migration. *AAPG*, 79: 19—29.

Yuan, Z. W., 1996. Deep basin gas in the Alberta basin. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).

Zeng, J. H., Wang, H. Y., 1999. An experimental study of

petroleum migration and accumulation in carrier bed and lithological trap. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 24(2): 193—196 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

金之钧, 张金川, 1999. 深盆地气藏及其勘探对策. 石油勘探与开发, 26(1): 4—5.

康永尚, 朱九成, 陈连明, 2002. 裂隙介质中石油运移物理模拟结果及地质意义. 地球科学——中国地质大学学报, 27(6): 736—740.

邱楠生, 方家虎, 2003. 热作为油运移动力的物理模拟实验. 石油与天然气地质, 24(3): 210—214.

邱楠生, 金之钧, 2000. 油气成藏的脉动式探讨. 地学前缘, 7(4): 561—567.

邱楠生, 金之钧, 胡文暄, 2000. 东营凹陷油气充注历史的流体包裹体分析. 石油大学学报, 24(4): 95—97.

邱楠生, 康永尚, 樊洪海, 等, 1999. 柴达木盆地西部地区第三系温度压力和油气分布相互关系探讨. 地球物理学报, 42(6): 826—833.

袁政文, 1996. 阿尔伯达深盆地气研究. 北京: 石油工业出版社.

曾溅辉, 王洪玉, 1999. 输导层和岩性圈闭系统中油气运移和聚集模拟实验研究. 地球科学——中国地质大学学报, 24(2): 193—196.

* * * * *

《地球科学——中国地质大学学报》

2004 年 第 29 卷 第 5 期 要目预告

大型油气系统形成的盆地动力学背景	李思田等
中国近海含油气盆地新构造运动与油气成藏	龚再升等
湖平面相对升降对断陷湖盆充填过程影响的数值模拟	蔡希源等
西加拿大盆地油砂储层中的泥夹层描述	胡元现等
莺歌海盆地坡折带特征及其对沉积体系的控制	谢玉洪等
南海海域新生代沉积盆地构造演化的动力学特征及其油气资源	姚伯初等
太平洋古陆的破碎消亡与华北克拉通在中新生代的板内构造岩浆活化关系	周瑶琪等
渤中坳陷超压—构造活动联控型流体流动与油气快速成藏	郝 芳等
异常压力环境下流体活动及其油气运移主通道分析	解习农等