

文章编号: 1001-6112(1999)04-0357-07

分阶段排烃模拟模型研究

张卫华¹, 陈荣书², 陈习峰³, 唐金良¹

(1. 南京石油物探研究所, 江苏南京 210014; 2. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074;
3. 江苏油田南京物探研究院, 江苏南京 210046)

摘要: 本文提出了一种新型实用的排烃模拟模型。根据该模型可将排烃分为单因素排烃和双因素排烃两个阶段。在单因素排烃阶段, 含油饱和度是烃类排出的唯一控制因素, 排烃的动力是压实作用; 在双因素排烃阶段, 排烃受临界含油饱和度和临界破裂压力的双重控制, 排烃的动力是流体超压。这突破了以往单阶段或单因素排烃模拟研究的局限并避开对排烃复杂相态的研究, 避免了误差的积累。该模型的关键是两阶段的划分标准及临界含油饱和度(S_c)及临界破裂压力(p_c)的确定和流体超压的求取。该模型在辽河盆地东部凹陷驾掌寺洼陷烃源岩定量评价中取得了良好的应用效果。

关键词: 排烃模拟模型; 单、双因素; 临界含油饱和度; 临界破裂压力; 流体超压; 辽河盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

盆地模拟技术自 80 年代引入我国以来, 已获得了长足的发展和进步; 但由于石油生成排出和运移聚集的机理还不十分清楚, 盆地模拟技术的进一步发展受到了制约。但从整个石油地质科学的发展来看, 由定性向定量发展是不可逆转的。在实际工作中我们不可避免地要回答生成了多少油气、何时生成, 排出了多少油气、何时排出, 如何运移、在何处聚集等一系列问题。这些问题的解决实际上提供了有效的生储盖时空配置信息和可供利用的油气资源量。这无疑将极大地提高油田的勘探效率, 减少投资风险。盆地模拟发展的直接动力也就来源于此。

盆地模拟技术的进一步发展和完善取决于排烃研究和运移聚集研究的发展和完善。其中排烃研究又是首先应该突破的地方, 因为它直接影响并决定着运移聚集研究的精度。对于排烃研究许多人作了有益的探索, 有 Price(1976)提出的水溶液说、Magara(1976)提出的连续油相说及陶一川(1989)的面积法等不下几十种排烃模拟模型^{[1][2][3][4]}。这些模型大致可分为两类, 一是通过对排烃机理某一方面的研究建立排烃模型, 另一类是避开机理的研究建立排烃模型。在目前情况下完全弄清楚排烃机理不太可能, 而完全避开排烃机理显然不太现实。鉴于地质科学的特殊性和复杂性, 目前最有效的手段就是在

遵循基本地质规律的同时, 避开对复杂机理过于刻板的追求, 这符合当前石油地质科学由定性向定量发展的趋势, 也是今后相当长时间内研究排烃应遵循的准则。在这种思想指导下, 我们在对排烃机理进行深入研究的同时, 避开对排烃复杂相态的研究, 提出了分阶段排烃模拟模型, 并实际应用到生产实践中去, 取得了良好的效果。

1 分阶段排烃的基本地质原理模型

许多地质学家都认为压实在油气初次运移中起着重要的作用(郝石生, 1994; 陈发景, 1989)^{[5][6]}, 并为此建立了压实排烃模型。我们认为在沉积物埋藏较浅、孔隙度较高的时期, 沉积压实的直接结果是沉积物孔隙体积的减小和孔隙流体的排出, 如果此时烃源岩中有足够的油气形成, 那么油气的确会在压实作用的影响下发生初次运移; 但当烃源岩埋藏较深、烃源岩的可压实量较小并且孔隙开始封堵时, 压实作用就不能成为油气运移的主要动力。单因素排烃是解决浅部烃类排出的一个较好的模型; 双因素排烃模拟模型则针对深部烃类排出的特点, 综合考虑了运移通道和运移动力, 是解决深部排烃的一个较好的模型, 并在辽东湾、辽河油田、新疆等地得到

收稿日期: 1998-11-12.

作者简介: 张卫华(1972-), 男, 湖北红安人, 硕士, 石油地质.

了较为广泛的应用,取得了良好的效果。分阶段排烃模拟模型综合考虑烃源岩在浅部排烃和深部排烃的特点,将排烃分为单因素排烃和双因素排烃两个阶段。压实排烃适用于孔隙流体排出最初受阻的以前阶段,在这个阶段,流体压力为静水压力,孔隙连通,压实为排烃的主要动力;双因素排烃模型适用于孔隙封堵后阶段,在此阶段,超压为排烃主要动力,裂缝为主要运移通道。基本原理如图 1 所示^{[7][8]}。

1.1 单因素排烃模拟模型

单因素排烃模拟模型有 3 个基本假设:

岩石骨架不可压缩,即压实流体排出量等于压实前后烃源岩孔隙体积的减小量;

④孔隙流体处于静水压力状态;

(四)烃类生成后一次性排出。

烃类的排出量 Q_{EHC} 可用下式计算:

$$Q_{EHC} = Q_{GHC} - Q_{RHC}$$

式中: Q_{GHC} 为生烃量,可由生烃模型获得; Q_{RHC} 为残留烃量,可表示为 $Q_{RHC} = V_i \cdot S_{rhc}$; V_i 为 i 时刻烃源岩孔隙体积,可由地史模拟获得; S_{rhc} 为残留烃饱和度,可由下式求得:

$$S_{rhc} = A C_{rg} [(1 - Q_h) \rho_m + Q_h \rho_f] / \rho_{or}$$

式中: A 为烃源岩中氯仿沥青 “A” 的含量; C_{rg} 为原油恢复系数,由 $C_{rg} = 1 / (1 - F_{250})$ 确定; F_{250} 为 250°C 以下原油饱和含量; Q_h 为泥岩孔隙度; ρ_{or} 为残余油密度; ρ_m 为岩石骨架密度; ρ_f 为流体平均密度。

在对某一研究区典型井取样分析计算后,可得该区残余油饱和度与深度的关系曲线,利用此曲线可获得该区不同深度上烃源岩的残余油饱和度。

烃类的何时排出则由临界含油饱和度控制,即当含油饱和度达到临界含油饱和度时烃源岩即开始排烃。所谓临界含烃饱和度 (S_{chc}) 是指烃类从源岩中排出所需的最小烃饱和度,其求取将在下面讨论。

1.2 双因素排烃模型

双因素排烃模拟模型是指以临界含油饱和度和破裂压力作为控制排烃的基本因素的排烃模拟模型。它认为只有孔隙流体压力达到破裂压力值而且含油饱和度超过临界值时才开始排烃,并持续到压力下降裂缝重新封闭为止。烃源岩在条件合适时可以有几次这种排烃过程,即脉冲式排烃。本模型的前提是异常高压为烃类排出的唯一动力,裂缝是烃类排出的唯一通道;核心是压力的求取及临界含油饱和度和临界破裂压力的计算。

| 孔隙变化示意图 | 流体压力特征 | 含油情况 | 各阶段基本特征 | 排烃情况 | 适用排烃模型 |
|---------|---------------------|---------|----------------------------------|------|---------|
| | 静水压力 | $< S_c$ | 孔隙连通,流体能顺利排出 | 不排 | 单因素排烃模型 |
| | | $> S_c$ | | 排 | |
| | 流体产生超压 $p < p_c$ | $< S_c$ | 孔隙缩小,喉道紧缩,排液受阻,形成死孔隙,能量开始聚集 | 不排 | |
| | | $> S_c$ | | 排 | |
| | $p > p_c$ | $< S_c$ | 死孔隙内流体能量开始聚集,使得流体压力大于临界破裂压力,流体排出 | 不排 | 双因素排烃模型 |
| | | $> S_c$ | | 排 | |
| | $p < p_c$ | $< S_c$ | 压力释放,压裂的孔隙重新封闭,形成死孔隙 | 不排 | |
| | | $> S_c$ | | 不排 | |

图 1 分阶段排烃模拟模型地质原理图

Fig. 1 Geological principle of a simulation model for stage-by-stage hydrocarbon expulsion

1.2.1 压力的求取

关于产生微裂缝的原因不同学者的看法不同。Hedberg(1978)强调甲烷的作用, Barker(1978)^[13]强调水热作用,也有强调成烃增压作用(徐国焯,1996)^[19]的。实际上所有引起流体压力增大的因素都是导致微裂缝产生的因素。Bethe(1986)在这方面作出了大胆的尝试,提出了反映单相流体异常压力形成机制的二维超压方程,把超压研究向前推进了一大步^[10]。陶一川(1992)进一步推出了二维二相的流体超压方程。本研究中采用陶一川的方程,其推导见参考文献^[11]。

1.2.2 临界含油饱和度的确定

M. F. Tarafa(1983)、陈荣书(1995)^[12]等认为:烃源岩在历史上排过烃时,则现今残留烃饱和度即可认为是烃源岩在对应深度上的临界含烃饱和度。庞雄奇(1993)推导了一个基于残留烃饱和度的临界含油饱和度计算模型,它也没有考虑烃源岩现今的排烃状况^[13],这可能有待商榷。烃源岩如现今仍在排烃,则现今残留烃饱和度实际上要大于临界含油饱和度。目前最好的方法就是在综合研究的基础上编制研究区不同类烃源岩的临界含油饱和度量板(图2)。

1.2.3 临界破裂压力的确定

临界压力的确定有理论法和实验经验法两种。石广仁(1994)认为理论与实验都可证明当生油层中的流体压力超过其上覆沉积物总负载的0.85倍时,岩石骨架发生破裂并形成与层面垂直的微裂缝。但他并未作理论上的推层,也未给实验依据。许多学者赞同以0.85作为破裂压力系数(陈荣书,1992;陶一川,1995)。辽东湾地区钻井工程实测结果表明,碎屑岩的破裂压力在其上覆沉积物总负载的0.80~0.85倍之间(何炳骏,1992)。P. Ungerer(1988)认为孔隙流体压力达到或接近于总应力中的最低张量时,岩石将产生裂缝和微裂缝,并从理论上进行了推导。由于不同温压条件下岩石的抗张强度不同,一般计算时均采用经验系数法。本研究中泥质烃源岩的破裂压力系数取0.85,煤岩取0.95。

1.3 排烃量计算

当烃源岩中流体压力达到破裂压力且含油饱和度超过临界值时,开始排烃。排烃过程中压力不断下降,直到降至某一界限(即最低裂缝保持压力)为止。

Hunt曾认为这一界限约为0.59倍的地静压力,即1.30倍的静水压力,本研究中取0.60倍的地静压力。排烃量可由下式求取: $Q_{EHC} = Q_{GHC} - Q_{RHC}$ 。

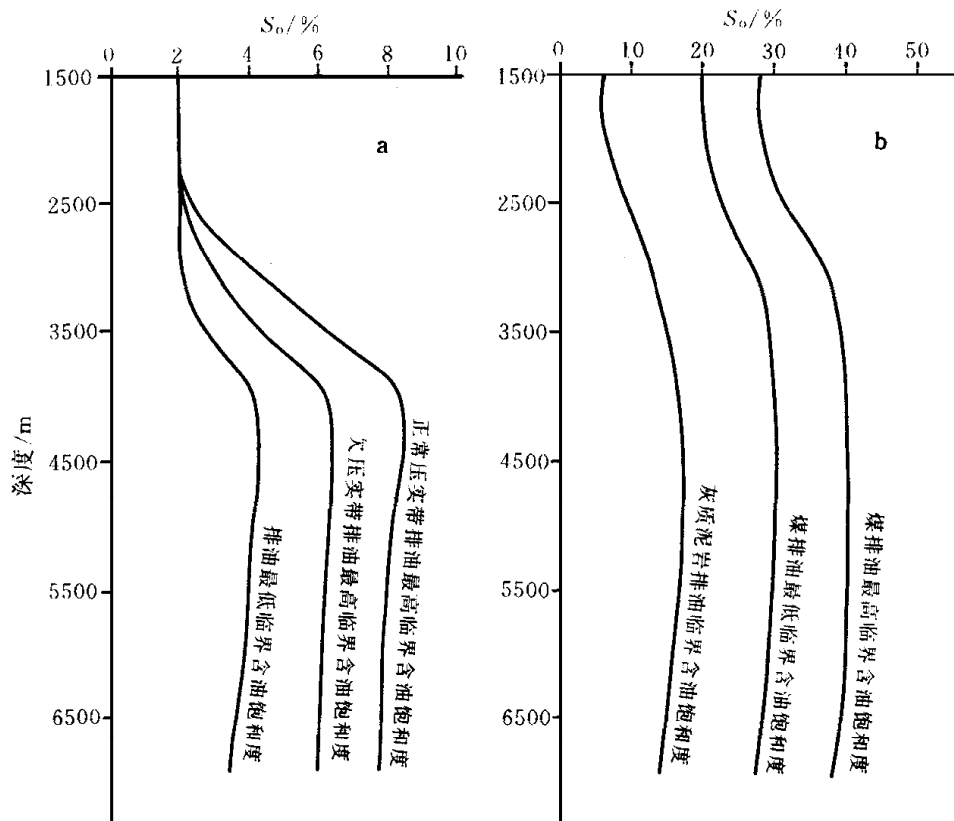


图2 研究区临界含油饱和度量板:a. 泥质烃源岩;b. 碳质泥岩及煤

Fig.2 Curves of critical oil saturation in the study area for

(a) pelitic hydrocarbon source rocks and (b) carbargillite and coal

2 分阶段排烃模拟模型的建立

阶段排烃模拟模型的建立关键是确定划分阶段的标准。一般认为超压的出现表明流体排出受阻,孔隙开始封堵,即标志着压实排烃的结束(郝石生,1994)。但实际上如果流体生成速度大于流体排出速度,也会导致出现暂时的超压。目前尚无有效的手段区分孔隙封闭造成的超压与其它因素超成的超压,因此仍把超压的首次出现作为压实排烃阶段结束的标志。单因素排烃和双因素排烃的程序框图 这里不再给出,仅给出耦合后的阶段排烃模拟模型程序

框图(图 3)。

从图中可以看出阶段排烃模型并不一定要求排烃有两个阶段,在某些情况下可以只有一个阶段。该模型最大的特点是避开对油气赋存及排出相态的研究,采用生烃量减残烃量计算排烃量,从而避免了误差的积累;同时根据深浅部烃类排出的实际特点将烃类排出阶段化,从而更符合客观实际。其不足是油气由于各自的物理性质不同,运移聚集的特征也不同,将油气笼统作为烃相处理,对后续的运聚研究将造成不便。但是对于勘探早期烃源岩的定量评价而言,它是可取的并值得推广。

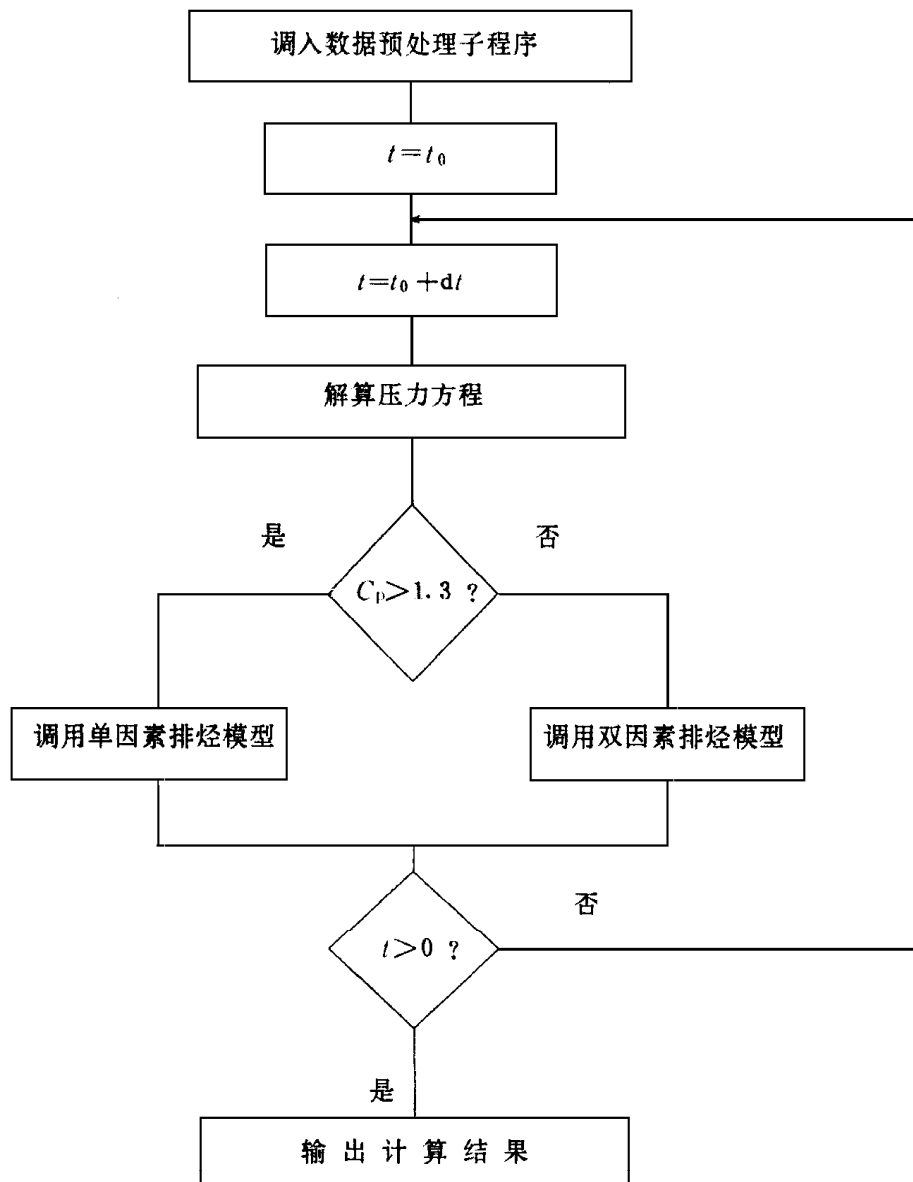


图 3 分阶段排烃模拟模型程序框图

Fig. 3 Program flow diagram of a simulation model for stage-by-stage hydrocarbon expulsion

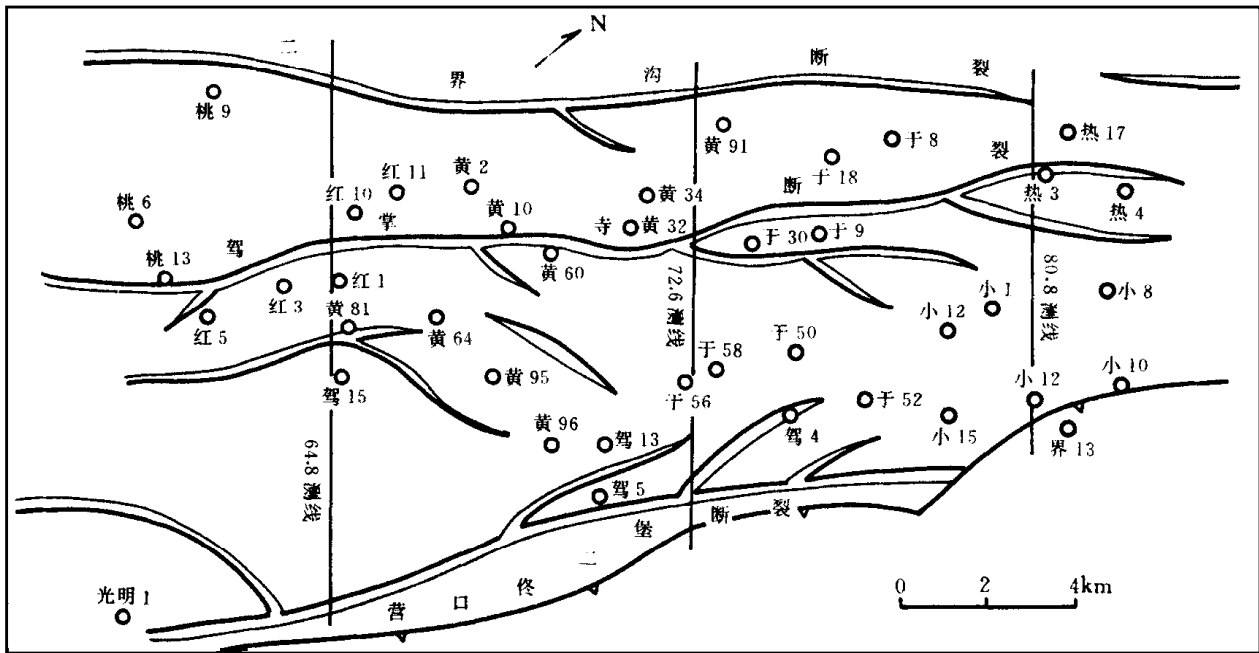


图4 模拟测线位置示意图

Fig. 4 Diagrammatic location map of simulated traverses

3 应用实例

我们应用上述模型对辽河盆地东部凹陷驾掌寺洼陷 64.8 测线的烃源岩进行了生排烃定量模拟。测线位置如图 4 所示。模拟结果如下:

(1) E_s^1 末期

E_s^1 沉积时期,排烃集中在东部次洼的 E_s^3 下段,排烃强度小,最大累积排烃强度仅 $0.5\text{kg}/\text{m}^3$ 。西部次洼及中央断裂隆起带上尚未进入排烃阶段(图 5a)。

(2) E_d^3 末期

E_d^3 沉积时期,排烃强度有所增大,并扩展到西部次洼,但排烃层段仍为 E_d^3 下段。东部次洼累积排烃强度在 $0\sim 1.75\text{kg}/\text{m}^3$ 之间,平均约 $1\text{kg}/\text{m}^3$;西部次洼排烃强度极低,约 $0.5\text{kg}/\text{m}^3$;中央断裂隆起带尚未进入排烃阶段(图 5b)。

(3) E_d^1 末期

E_d^1 沉积时期,排烃强度显著增大,排烃范围扩展至 E_s^3 上段。东部次洼 E_s^3 下段累积排烃强度在 $1\sim 7\text{kg}/\text{m}^3$ 之间,大部分地区累积排烃强度在 $1\sim 2.5\text{kg}/\text{m}^3$ 之间,存在一个排烃宽缓带,沉积中心排烃强度梯度大。西部次洼累积排烃强度在 $0\sim 2.5\text{kg}/\text{m}^3$ 之间。中央隆起带开始排烃,强度约为

$1\text{kg}/\text{m}^3$ (图 5c)。

(4) 现今时期

同 E_d^1 末期相比排烃强度增加幅度不大,但排烃层位进一步扩大至 E_s^1 段。东部次洼排烃特征同 E_d^1 末期相比, E_s^3 下段排烃宽缓带内排烃不均一性增大,出现一个局部的排烃中心,中心最大累积排烃强度约为 $5\text{kg}/\text{m}^3$,沉积中心最大排烃量增至 $9\text{kg}/\text{m}^3$; E_s^3 上段累积排烃强度在 $1\sim 3\text{kg}/\text{m}^3$ 之间; E_s^1 段累积排烃强度一般小于 $1\text{kg}/\text{m}^3$ 。西部次洼 E_s^3 下段累积排烃强度一般大于 $3\text{kg}/\text{m}^3$, E_s^3 上段累积在 $1\sim 3\text{kg}/\text{m}^3$ 之间, E_s^1 段排烃特征同东部次洼类似。中央隆起带上排烃仍限于 E_s^3 下段,累积排烃强度在 $1\sim 3\text{kg}/\text{m}^3$ 之间(图 5d)。

4 结语

排烃研究目前仍然是盆地模拟中一个非常薄弱的环节,进一步的研究有待石油地质科学的发展。在油气运聚成藏机理没有完全弄清楚之前,完美地解决排烃问题显然不现实。但当前每一步有益的探索都将对盆地模拟技术的发展起到促进作用,推动石油地质科学向量化更快地发展。

致谢:本研究得到了中国地质大学张家骅教授、唐仲华教授的大力支持与帮助。在此深表感谢!

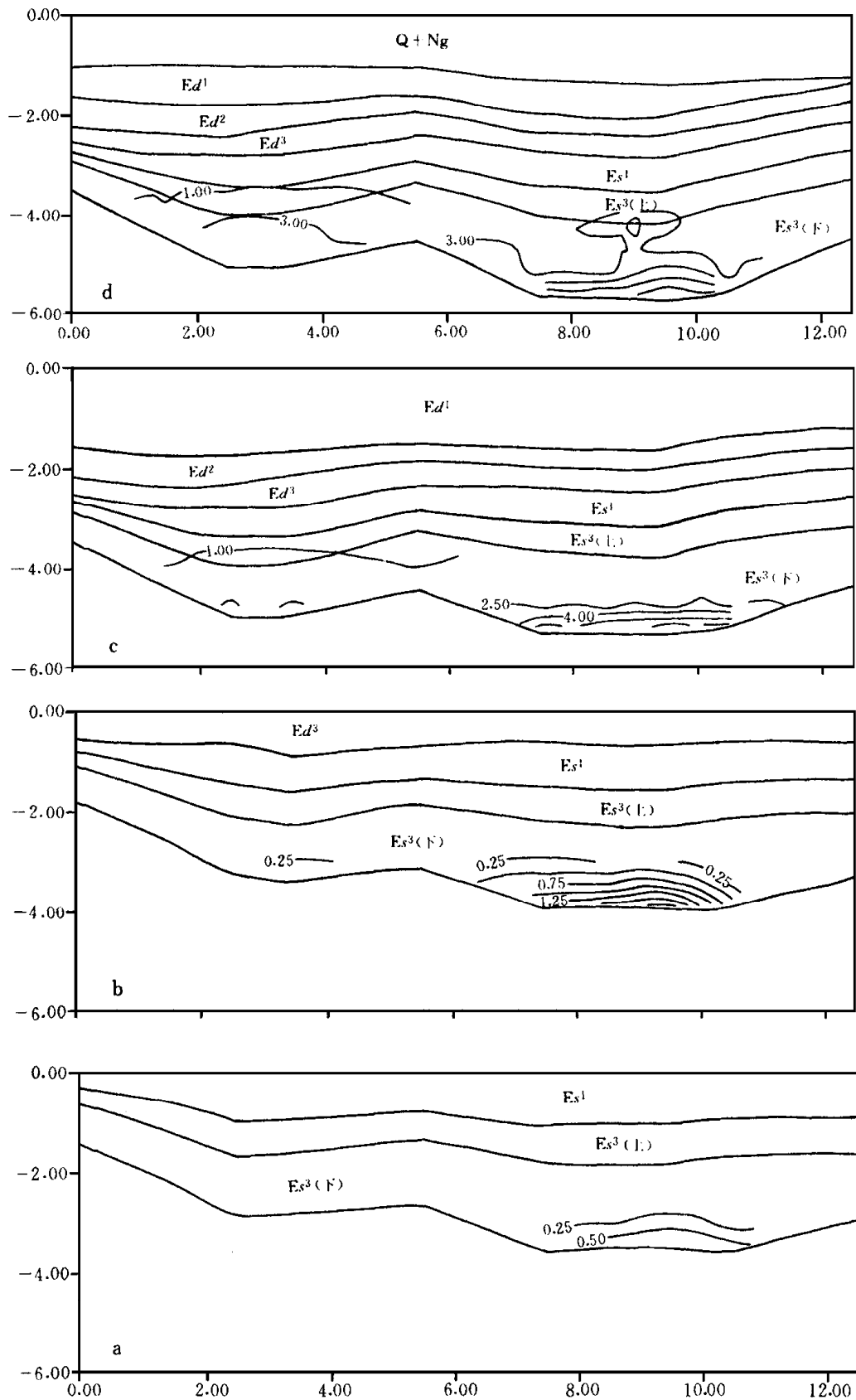


图 5 64.8 测线排烃强度史图(单位: kg/m^3)

a. Es¹ 末期; b. Ed³ 末期; c. Ed² 末期; d. 现今

Fig. 5 Map of the hydrocarbon-expulsion strength history for the 64.8 traverse

参考文献:

- [1] Yukler M A, Dahl B 著. 周庆凡译. 盆地模拟技术前景[J]. 国外油气勘探, 7(6): 676~678.
- [2] Ozkaya I. Computer simulation of primary oil migration in Kurait[J]. Journal of Petroleum Geology, 1991, 14(1): 37~48.
- [3] 李明诚. 石油与天然气运移[M]. 北京: 石油工业出版社, 1987.
- [4] 陶一川, 范士芝. 排烃效率研究的一种新方法及应用实例[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1989, 14(3): 259~268.
- [5] 郝石生, 等. 油气初次运移模拟模型[J]. 石油学报, 1994, 15(2): 21~30.
- [6] 陈发景, 等. 压实与油气运移[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989.
- [7] 王新洲, 等. “压实-排液”定量排油机理研究[J]. 陆相石油地质, 1992, (1): 33~41.
- [8] 大熊宏著. 张小兰, 刘玉兰译. 应用运移、聚集模型评价沉积盆地的方法——关于以室内试验为对象的样机模型及其应用的预备性研究[J]. 世界石油科学, 1994, 64(5): 30~35.
- [9] 徐思煌, 何生, 等. 烃源岩演化与生、排烃史模拟模型及应用[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1995, 20(3): 335~341.
- [10] Bethé C M. A numerical model of compaction driven ground water flow and heat transfer and its application to the Paleohydrology of intracraton sedimentary basins[J]. Journal of Geophysical Research, 1986, 90: 6817~6823.
- [11] 陶一川. 流体渗流力学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992.
- [12] 陈荣书, 唐仲华, 徐思煌, 等. 双开关排烃模型及其在辽东湾地区的应用[J]. 中国海上油气(地质), 1995, 9(4): 253~262.
- [13] 庞雄奇, 等. 含油气盆地地史、热史、生留排烃史数值模拟研究与烃源岩定量评价[M]. 北京: 地质出版社, 1993.

STUDYING ON THE SIMULATION MODEL OF STAGE-BY-STAGE HYDROCARBON EXPULSION

ZHANG Wei-hua¹, CHEN Rong-shu², CHEN Xi-feng³, TANG Jin-liang¹

(1. Comprehensive Branch, Institute of Geophysical Prospecting for Petroleum, Nanjing, Jiangsu 210014, China;

2. College of Resources, China University of Geology, Wuhan, Hubei 430074, China;

3. Nanjing Institute of Geophysical Prospecting, Jiangsu Oil Field, Nanjing, Jiangsu 210046, China)

Abstract: A new-type practical hydrocarbon-expulsion model is suggested in this paper. According to this model, hydrocarbon expulsion can be divided into monofactor and bifactor two stages. During the monofactor hydrocarbon-expulsion stage, oil saturation is the only controlling factor to the expulsion of hydrocarbons, and the driving force of hydrocarbon expulsion is compaction; in the difactor hydrocarbon-expulsion stage, the expulsion of hydrocarbons is doubly controlled by critical oil saturation and critical fracturing pressure, and the driving force of hydrocarbon expulsion is fluid overpressure. This breaks through the limitations to monostage or monofactor hydrocarbon-expulsion simulation before, refrains from studying on complex facies during hydrocarbon expulsion, and avoids the accumulation of errors. The key of the model is dividing standards of the two stages, the determination of critical oil saturation (S_c) and critical fracturing pressure (p_c), and the acquirement of fluid overpressure. This model has obtained good application effects during the quantitative evaluation on the hydrocarbon source rocks of the Jiazhangsi Sag in the eastern depression of the Liaohe Basin.

Key words: a hydrocarbon-expulsion simulation model; monofactor and bifactor; critical oil saturation; critical fracturing pressure; fluid overpressure; the Liaohe Basin