

# 库车坳陷的油气运移全定量模拟

石广仁,张庆春

中国石油勘探开发研究院,北京 100083

**摘要:** 为了给库车坳陷的油气勘探提供定量依据,使用盆地模拟软件 BASIMS 对该坳陷的地史、热史、成岩史、生烃史、排烃史及运聚史进行了全定量模拟。其中油气初次运移的模拟使用简易而实用的方法,即:对于油气初次运移,采用沉积压实渗流法求排油、物质平衡法求排气;对于油气二次运移,采用基于浮力驱动及达西定律的拟三维运聚模型。除了讨论这些数值方法的敏感性参数(参数敏感性与风险分析、排烃分配因子、断层及不整合面的渗透率、油气储集单元的确定)外,给出了排烃史和运聚史的模拟结果,其聚集量的模拟结果不仅在数量上而且在位置上与实际情况符合,尤其是预测出的几个有利勘探目标后来被勘探结果所证实。

**关键词:** 库车坳陷;敏感性参数;初次运移;沉积压实渗流法;物质平衡法;二次运移;拟三维运聚模型。

中图分类号: P618.130

文章编号: 1000-2383(2004)04-0391-06

收稿日期: 2004-03-18

## Quantitative Simulation of Hydrocarbon Migration in Kuqa Depression

SHI Guang-ren, ZHANG Qing-chun

Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China

**Abstract:** The histories of stratigraphic burial, geotherm, diagenesis, hydrocarbon generation, expulsion and migration-accumulation are simulated quantitatively by means of the basin modeling software of BASIMS in order to provide the quantitative data for oil and gas exploration in Kuqa depression. Of them, hydrocarbon primary migration is simulated by the easy and practical methods, i. e. sedimentary compaction-filtration method is used to calculate the amount of expelled oil and the mass balance method to calculate the amount of expelled gas. The pseudo 3-D migration-accumulation model based on buoyancy and Darcy's Law is used to simulate on secondary hydrocarbon migration. The sensible parameters (parameter sensitivity and risk analyses, distribution ratio of hydrocarbons expelled, permeabilities in fault and unconformity zones, and determination of reservoir cell) in these numerical methods are discussed, and hydrocarbon expulsion and migration-accumulation histories have been simulated in detail. The modeling results are in agreement with the real pools not only on quantities but also on locations, and especially some predicted prospects have been proved by explorations later.

**Key words:** Kuqa depression; sensible parameter; primary migration; sedimentary compaction-filtration; mass balance; secondary migration; pseudo 3-D migration-accumulation model.

迄今为止,油气初次运移和二次运移依然是石油地质过程研究的最大难点,其运移的方式、相态、通道及驱动力等许多疑难问题仍倍受争议(石广仁等,1997a; Waples, 1998; Shi, 2000),在短时期内难以解决。为了避开尚未解决的复杂机理问题,中国石油勘探开发研究院使用 BASIMS 盆地模拟软件对油气初次运移和二次运移进行了全定量模拟。对于

油气初次运移,采用沉积压实渗流法求排油(石广仁,1999),它基于逐次沉积压实排液、二相渗流确定排液量中油水比的原理,采用物质平衡法求排气(米石云等,1994;石广仁,1999),即算出烃源层的总残留气量(包括残余水溶解气量、残余油溶解气量及烃源岩本身的吸附气量),再将烃源层的生气量减去总残留气量便得排气量。对于油气二次运移,采用基于

浮力驱动及达西定律的拟三维运聚模型,研究油气在平面(展布在有一定厚度的地层)的运移、聚集(石广仁等,1997b;石广仁,1999)。通过多年的应用、改进与完善,收到较好的地质效果(张庆春等,2001)。本文以库车坳陷为实例,论证上述油气运移全定量模拟方法的有效性。

## 1 数值方法的敏感性参数

在沉积压实渗流法求排油、物质平衡法求排气中,空隙度发育史是最敏感性参数。对此,除了沉积压实这一基本影响因素外,还应考虑成岩史,如:蒙皂石向伊利石转化史(Huang *et al.*, 1993),石英次生加大史(Walderhaug, 1996)等。物质平衡法所用的PVT函数也是重要的敏感性参数。在拟三维运聚模型中,重要的敏感性参数是排烃分配因子、断层及不整合面的渗透率、油气储集单元的确定。

### 1.1 参数敏感性与风险分析

一个大型盆地模拟系统约需 60 类参数(石广仁,1999),几乎涵盖了石油地质研究所涉及的全部定量数据,种类繁多、数据量浩大。所以,必须从勘探实际出发,选择数值不确定性大并严重影响模拟结果的那些关键参数,对它们施行参数敏感性分析与风险分析(Thomsen, 1998)。

根据油气勘探实际选择关键性参数,在其最小值及最大值情况下对盆地模拟中计算量不太大的相关模型进行多次计算,以达到参数敏感性分析之目的;在此基础上用蒙特卡罗法(Monte Carlo)算出各关键性参数可能的数值范围内相关模型模拟结果的概率分布,实现盆地模拟的风险分析,从而使得敏感性参数的数值选取尽量合理。

### 1.2 排烃分配因子

国外一般使用有机地化法估算这种排烃分配因子(Sweeney *et al.*, 1995)。本文则根据油气成藏原理,烃源岩中排出的油气沿优势输导层运移通道向储集层运移,其运移量的大小同该储集层中的已探明储量和可能储量是成正比的。因此,可以通过地质条件、已探明储量及可能储量分析估算各层系的排烃分配因子。表 1 是主要根据库车坳陷已探明储量和可能储量统计而得出的从烃源层 J(侏罗系)和 T(三叠系)在主要储集层中的排烃分配因子。

### 1.3 断层及不整合面的渗透率

断层控制是指网格体有断层通过时的渗透率特

表 1 库车坳陷烃源层 J-T 在主要储集层中的排烃分配因子  
Table 1 Distribution ratios of hydrocarbons expelled from source-rock formations J-T

储集层	排烃分配因子						
	$N_2k$	$N_{1+2k}$	$N_{ij}$	E	K	J	T
南部	0.02	0.03	0.03	0.04	0.40	0.36	0.12
北部	0.02	0.03	0.10	0.40	0.20	0.13	0.12

殊处理,即:任何断层地带的渗透率可用一种特定的实验与计算相结合的方法求出(Jourde *et al.*, 2002; Shipton *et al.*, 2002),而不能用计算主岩渗透率的 Kozeny-Carman 公式(Shi, 2000)。对于某些地区的平行断层,其渗透率比主岩渗透率要高出接近 1 个数量级;相反,正断层渗透率比主岩渗透率要小 2 个数量级(Jourde *et al.*, 2002)。不整合面控制的处理方法与上述的断层控制相似。

### 1.4 油气储集单元的确定

岩性控制用于油气储集单元的确定。储集体应由足够多的储集岩组成。一般而言,储集岩主要分碎屑岩和碳酸盐岩 2 种,即砂岩和碳酸盐岩。对于每个网格体,应确定它是否为一个储集单元,存在 3 种情况(Shi, 2000):(1)当砂岩含量超过储集砂岩含量门限(如 0.55~0.75),则该网格体可定为油、气储集单元;(2)对于碳酸盐岩,应考虑沉积相、成岩作用及构造裂缝的影响,选择有利的含碳酸盐岩网格体定为油、气储集单元;(3)其余情况,定为非储集单元。这样,油、气储集单元中的烃类才是聚集量,而非储集单元中的烃类则是运移损失量。

## 2 实例应用

库车坳陷位于塔里木盆地的北部,北倚南天山造山带,南界塔北隆起,东西长约 300 km,南北宽约 50~90 km,西宽东窄,面积约  $4 \times 10^4$  km<sup>2</sup>。截至 2003 年底,该坳陷内已钻探井 102 口,其中获工业油流井 2 口,获工业气流井 56 口。油气藏类型有凝析油气藏、干气气藏和油藏 3 种。在该坳陷中已经发现 2 个油田及 13 个气田,成为中国最富的天然气的聚集区之一(图 1)。

库车坳陷是在海西运动基础上于晚二叠世开始发育起来的中新生代叠合坳陷。坳陷演化具有多阶段性和复杂性,中新生代陆相地层发育齐全,后期褶皱—冲断变形改造强烈。主力烃源岩为中、上三叠统湖相泥岩和中、下侏罗统湖泊沼泽相煤系地层,平均

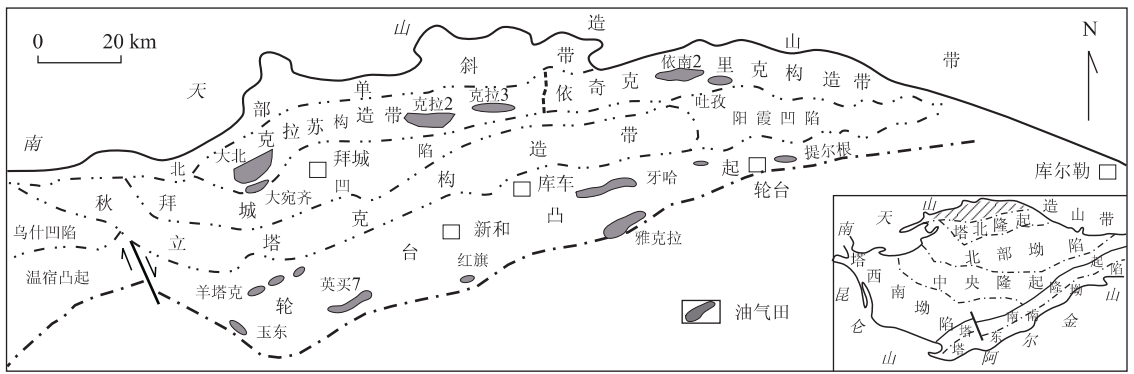


图 1 库车坳陷构造及油气田分布(据赵靖舟和戴金星修改,2002)

Fig. 1 Structures and reservoirs in Kuqa depression (modified from Zhao and Dai, 2002)

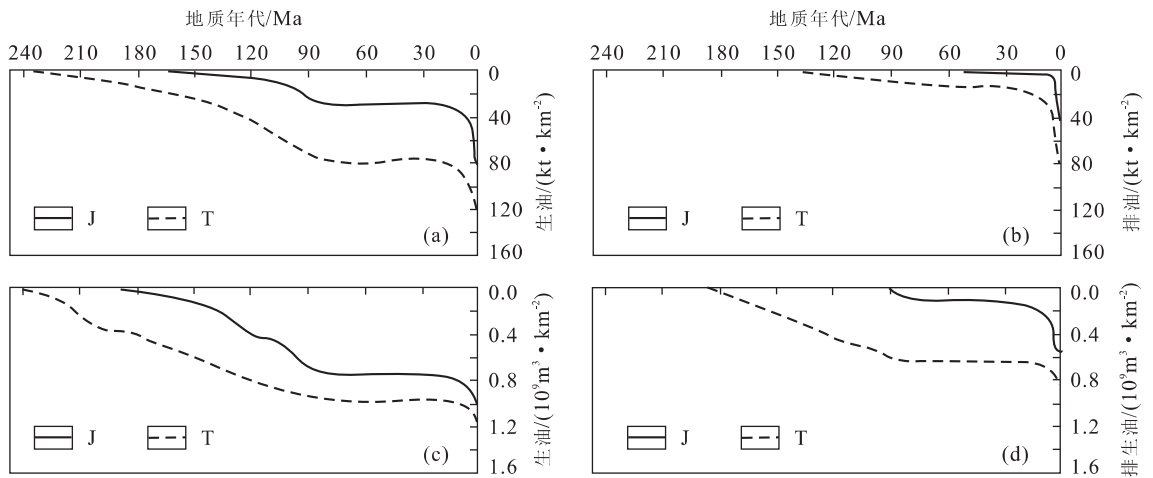


图 2 库车坳陷克拉 2 井油、气的累积生、排强度史

Fig. 2 Cumulative oil/gas generation/expulsion strength history of Well Kela 2 in Kuqa depression

厚度达 600 m。暗色泥岩有机碳含量多在 1.5%~5%之间,煤层的残余有机碳均值为 58%。源岩干酪根类型以腐殖型(Ⅲ型)为主,约占 90%,其次是腐泥腐殖型(Ⅱ型),约为 10%。源岩现今主体成熟度  $R_o$  在 0.7%~1.8%之间,处于成熟—高成熟阶段,以生气为主。第三系巨厚(100~1 000 m)的盐—膏—泥优质区域盖层封盖了整个坳陷,而这个区域盖层之下分布着下第三系和白垩系的良好砂岩储集层,优越的源、盖条件形成了如克拉 2、大北等大型气藏以及如牙哈、英买 7、羊塔克等中型凝析油气田(周兴熙,2001;赵靖舟和戴金星,2002;杨明慧等,2002)。

### 2.1 模拟结果

本次模拟共采集到了坳陷内 71 口已钻井的数据以及从地震剖面上所取的 577 口人工模拟井数据,共计 9 万余个。

**2.1.1 排烃史模拟** 在库车坳陷地史、热史、成岩史及生烃史的模拟结果基础上,继续进行排烃史的

计算(图 2),获得各烃源层在各地质年代的排烃强度平面等值图、总排烃量(图 3)以及坳陷各烃源岩的排烃史直方图(图 4)。坳陷的总生油量是  $29\ 390 \times 10^6$  t,而总排油量是  $13\ 767 \times 10^6$  t,故排油系数(排油量/生油量)为 46.8%;总生气量是  $202\ 600 \times 10^9$  m<sup>3</sup>,而总排气量是  $193\ 567 \times 10^9$  m<sup>3</sup>,故排气系数(排气量/生气量)为 95.5%(图 4)。

**2.1.2 运聚史模拟** 在排烃史的模拟结果基础上,继续进行运聚史的计算,获得各相关地层在各地质年代的烃类聚集强度平面等值图、总聚集量(图 5)以及坳陷运聚史直方图(图 6)。坳陷的总排油量是  $13\ 767 \times 10^6$  t,而总聚油量是  $409.2 \times 10^6$  t,故聚油系数(聚油量/排油量)为 3%;总排气量是  $193\ 567 \times 10^9$  m<sup>3</sup>,而总聚气量是  $2\ 244.9 \times 10^9$  m<sup>3</sup>,故聚气系数(聚气量/排气量)为 1.2%(图 6)。

### 2.2 结果分析

首先,观察运聚模拟结果(图 5)与已发现的油

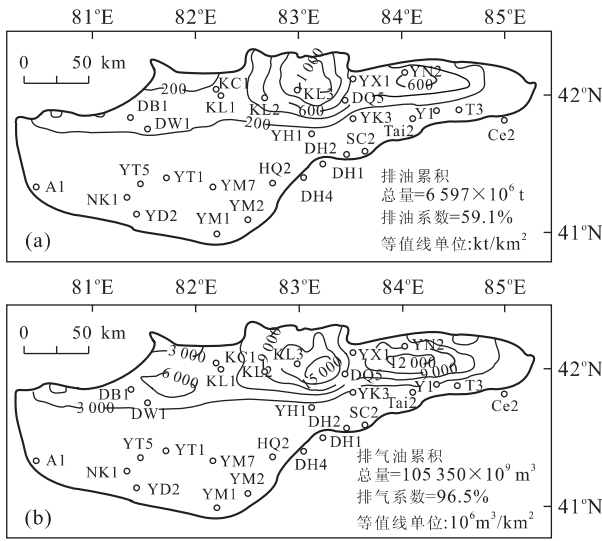


图 3 库车拗陷地层 J 的排油强度(a)和排气强度(b)(累积至今)

Fig. 3 Cumulative oil expulsion strength (a) and gas expulsion strength (b) of formation J in Kuqa depression at present-day

气田(图 1)的符合程度。根据目前的发现,库车拗陷储层 E 和 K 在相关油气田的油气分布如表 2 所示。对比表明:(1)图 6a 上的油聚集强度最大聚集带恰好是牙哈(YH)油田(表 2、图 1),其余油聚集强度较小的聚集带也有深入勘探的前景;(2)图 5b 上凡是具有较大气聚集强度的聚集带恰好是大北(DB)、克拉 2(KL2)、羊塔克(YT)、玉东(YD)、英买 7(YM7)、红旗(HQ)、提尔根(T)及牙哈(YH)等气田(表 2、图 1)。十分明显,模拟结果与目前勘探成果

吻合。

从整个模拟结果来看,还有如下几点认识:(1)油聚集时期主要是老第三纪(24~2 Ma),气聚集时期主要是新第三纪库车组期(5~2 Ma)(图 6)。烃类排聚时期与主要构造的形成时期基本是吻合的(图 4,6)。(2)主要储集层  $N_{1-2}k$ 、 $N_{1j}$ 、E、K、J、T 的现今油聚集量为  $409.2 \times 10^6$  t,气聚集量为  $2\ 244.9 \times 10^9$  m<sup>3</sup>(图 6),气为油的 5.486 倍,说明拗陷是富气的。由于评价方法相异,模拟结果虽与最近一次的圈闭评价算出的地质储量(油为  $380 \times 10^6$  t,气为  $2\ 100 \times 10^9$  m<sup>3</sup>,气为油的 5.526 倍)有些差别,但数量基本接近,尤其是气量与油量之比(表 3)。(3)模拟结果还为未来勘探预测出 YM7-HQ2 和 DW1 等 2 个富油构造(图 5a)以及 YT1-YT5、YX1 和 DQ5 等 3 个富气构造(图 5b),均被后来勘探所证实(图 1)。又如,已发现的位于下第三系的 KL1 油藏(图 6)、位于上白垩统一下第三系的 KL2 井区外围气藏(图 5b)都是落在模拟结果预测出的有利勘探区带内。总之,上述地质认识经勘探实践检验基本符合实际,说明本文介绍的库车拗陷的油气初次运移及二次运移的全定量模拟是相当成功的。

### 3 结论和讨论

通过库车拗陷的应用实例,可以得出如下结论:

(1)采用沉积压实渗流法求排油、物质平衡法求排气来研究油气初次运移,以及采用基于浮力驱动及达

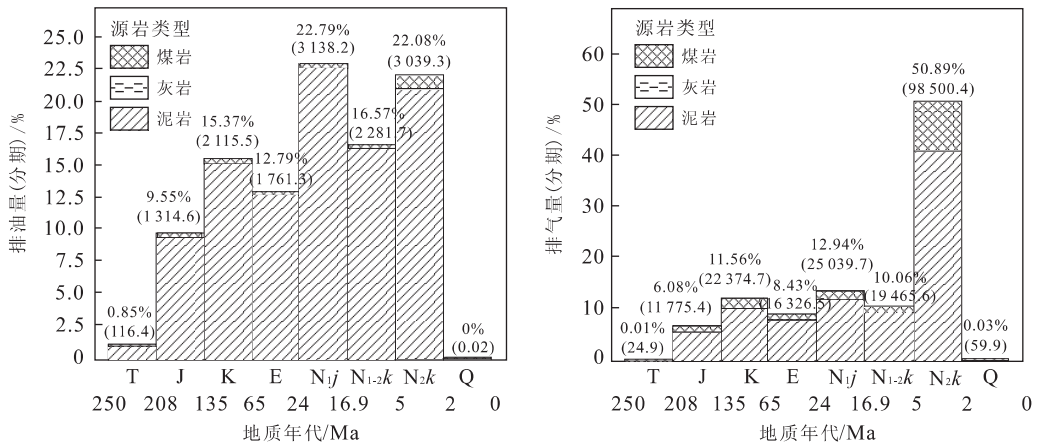


图 4 库车拗陷分期的排油量史(a)、排气量史(b)

Fig. 4 Periodic oil expulsion history (a) and gas expulsion history (b) in Kuqa depression

a. 排油累积总量 =  $13\ 767 \times 10^6$  t; 排油系数 = 46.8%; 括号内数的单位:  $10^6$  t; b. 排气累积总量 =  $193\ 567 \times 10^9$  m<sup>3</sup>; 排气系数 = 95.5%; 括号内数的单位:  $10^9$  m<sup>3</sup>

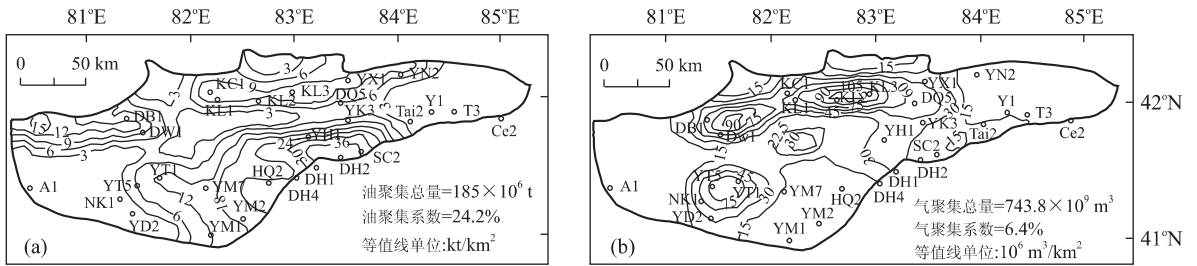


图 5 库车坳陷地层 E 的油聚集强度(a)和气聚集强度(b)(累积至今)

Fig. 5 Cumulative oil accumulation strength (a) and gas accumulation strength (b) of formation E in Kuqa depression at present day

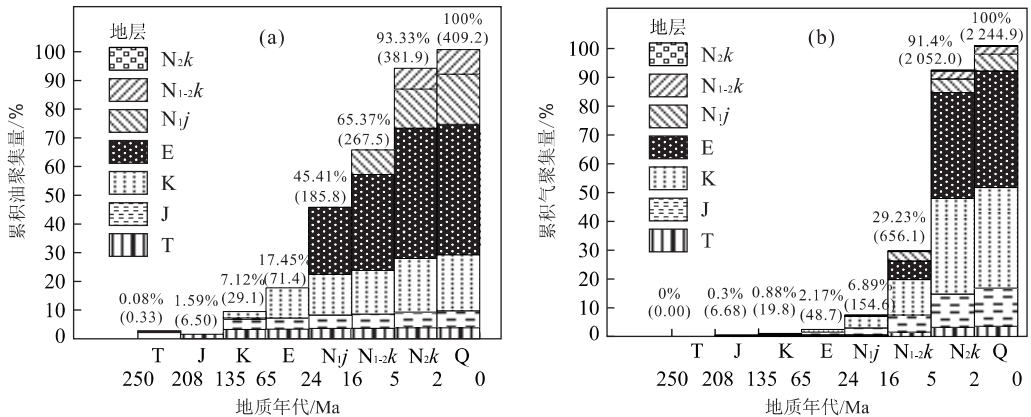


图 6 库车坳陷累积的油聚集量史(a)、气聚集量史(b)

Fig. 6 Cumulative oil accumulation history (a) and gas accumulation history (b) in Kuqa depression

a. 油聚集累积总量 =  $409.2 \times 10^6$  t; 油聚集系数 = 3.0%; 括号内数的单位:  $10^6$  t; b. 气聚集累积总量 =  $2\,244.9 \times 10^9$  m<sup>3</sup>; 气聚集系数 = 1.2%; 括号内数的单位:  $10^9$  m<sup>3</sup>

表 2 库车坳陷 E 油层和 K 气层所分布的油气田

Table 2 Oil/gas fields that have oil/gas reservoirs in Kuqa depression

储层	分布的油气田
E 油层	牙哈(YH)
K 气层	大北(DB), 克拉 2(KL2), 羊塔克(YT), 玉东(YD), 英买 7(YM7), 红旗(HQ), 提尔根(T), 牙哈(YH)

注: 油气田名称的中文见图 1, 拼音见图 5.

西定律的拟三维运聚模型来研究油气二次运移是有效可行的; (2) 库车坳陷油气运移的模拟结果不仅与实际情况符合, 而且预测出的几个有利勘探目

标后来也被勘探结果所证实.

然而, 由于油气运移机理的复杂性及地质因素的不确定性, 要想建立一个较完美的全定量模型并得到较好的应用效果, 对地质家来说仍是一个严重的挑战. 作者认为, 要想使上述方法得到较好的应用, 应注意两点: (1) 尽可能把地史、热史、成岩史和生烃史模拟得精确, 这是油气运移定量模拟的基础; (2) 尽量取准油气运移的敏感性参数.

致谢: 对于我院地质所张光亚总工程师、塔里木室李洪辉主任和周兴熙教授等在库车坳陷的盆地模

表 3 库车坳陷烃类的生、排、聚总量及资源量

Table 3 Total amount of hydrocarbons generated, expelled, accumulated and reserves in place in Kuqa depression

生烃		排烃				聚集				地质储量*	
		油		气		油		气		油/	气/
生油量/ ( $10^6$ t)	生气量/ ( $10^9$ m <sup>3</sup> )	排油量/ ( $10^6$ t)	排油 系数/%	排气量/ ( $10^9$ m <sup>3</sup> )	排气 系数/%	聚油量/ ( $10^6$ t)	聚油 系数/%	聚气量/ ( $10^9$ m <sup>3</sup> )	聚气 系数/%	( $10^6$ t)	( $10^9$ m <sup>3</sup> )
29 390	202 600	13 767	46.8	193 567	95.5	409.2	3.0	2 244.9	1.2	380	2 100

\* 据最近一次的圈闭评价

拟工作中所给予的帮助与指导表示最诚挚的感谢。

## References

- Huang, W. L., Longo, J. M., Pevear, D. R., 1993. An experimentally derived kinetic model for smectite-to-illite conversion and its use as a geothermometer. *Clays and Clay Minerals*, 41(2): 162—177.
- Jourde, H., Flodin, E. A., Aydin, A., et al., 2002. Computing permeability of fault zones in eolian sandstone from outcrop measurements. *AAPG Bulletin*, 86(7): 1187—1200.
- Mi, S. Y., Shi, G. R., Li, A. M., 1994. Expanding migration model on organic gas generation. *Petroleum Exploration and Development*, 21(6): 35—39 (in Chinese with English abstract).
- Shi, G. R., Li, A. M., Zhang, Q. C., 1997a. New advancement in basin modelling technology(I): Present developing situation. *Petroleum Exploration and Development*, 24(3): 38—40 (in Chinese with English abstract).
- Shi, G. R., Li, A. M., Zhang, Q. C., 1997b. New advancement in basin modelling technology(II): Separate formation 2-D plate models for simulation of hydrocarbon migration. *Petroleum Exploration and Development*, 24(4): 33—37 (in Chinese with English abstract).
- Shi, G. R., 1999. Numerical methods of petroliferous basin modeling (2nd edition). Petroleum Industry Press, Beijing, 127—133, 145—155 (in Chinese).
- Shi, G. R., 2000. Numerical methods of petroliferous basin modeling (2nd edition). Petroleum Industry Press, Beijing, 127—215.
- Shipton, Z. K., Evans, J. P., Robeson, K. R., et al., 2002. Structural heterogeneity and permeability in faulted eolian sandstone: Implications for subsurface modeling of faults. *AAPG Bulletin*, 86(5): 863—883.
- Sweeney, J. J., Braun, R. L., Burnham, A. K., et al., 1995. Chemical kinetic model of hydrocarbon generation, expulsion, and destruction applied to the Maracaibo basin. *AAPG Bulletin*, 79(10): 1515—1532.
- Thomsen, R. O., 1998. Aspects of applied basin modeling: Sensitivity analysis and scientific risk. In: Düppenbecker, S. J., Iliffe, J. E., eds., Basin modelling: Practice and progress. Spec. Pub. No. 141, Geol. Soc., London, 209—221.
- Walderhaug, O., 1996. Kinetic modeling of quartz cementa-

tion and porosity loss in deeply burial sandstone reservoirs. *AAPG Bulletin*, 80(5): 731—745.

- Waples, D. W., 1998. Basin modelling: How well have we done? In: Düppenbecker, S. J., Iliffe, J. E., eds., Basin modelling: Practice and progress. Spec. Pub. No. 141, Geol. Soc., London, 1—14.
- Yang, M. H., Jin, Z. J., Lü, X. X., et al., 2002. Kelasu triangle zone and its hydrocarbon potential in Kuqa thrust-and-fold belts, Tarim basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(6): 745—750 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q. C., Shi, G. R., Mi, S. Y., et al., 2001. Dynamic numerical modelling of petroleum system(II): A case study on the Manjar petroleum system, Tarim basin. *Petroleum Exploration and Development*, 28(5): 33—36 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J. Z., Dai, J. X., 2002. Timing and filling history of natural gas reservoirs in Kuqa foreland thrust belt, Tarim basin. *Acta Petrolei Sinica*, 23(2): 6—10 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. X., 2001. The reservoir-forming process and model in the Kuqa petroleum system. *Petroleum Exploration and Development*, 28(2): 8—10 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 米石云, 石广仁, 李阿梅, 1994. 有机质成气膨胀运移模型研究. *石油勘探与开发*, 21(6): 35—39.
- 石广仁, 李阿梅, 张庆春, 1997a. 盆地模拟技术新进展(一)—国内外发展状况. *石油勘探与开发*, 24(3): 38—40.
- 石广仁, 李阿梅, 张庆春, 1997b. 盆地模拟技术新进展(二)—油气运聚平面分层模拟方法. *石油勘探与开发*, 24(4): 33—37.
- 石广仁, 1999. 油气盆地数值模拟方法(第二版). 北京: 石油工业出版社, 127—133, 145—155.
- 杨明慧, 金之钧, 吕修祥, 等, 2002. 库车褶皱冲断带克拉苏三角带及其油气潜力. *地球科学——中国地质大学学报*, 27(6): 745—750.
- 张庆春, 石广仁, 米石云, 等, 2001. 油气系统动态数值模拟研究(二)—塔里木盆地满加尔油气系统模拟分析. *石油勘探与开发*, 28(5): 33—36.
- 赵靖舟, 戴金星, 2002. 库车前陆逆冲带天然气成藏期与成藏史. *石油学报*, 23(2): 6—10.
- 周兴照, 2001. 库车油气系统成藏作用与成藏模式. *石油勘探与开发*, 28(2): 8—10.