

文章编号:1001-6112(2012)03-0330-04

# 基于孔隙旋回建模单元的碳酸盐岩储层建模研究

唐洪<sup>1,2</sup>, 廖明光<sup>1,2</sup>, 胡俊<sup>1,2</sup>, 靳松<sup>3</sup>, 吴昌龙<sup>4</sup>

(1. 西南石油大学 资源与环境学院, 成都 610500; 2. 西南石油大学 天然气地质四川省高校重点实验室, 成都 610500;  
3. 中国石油海外勘探开发公司, 北京 100724; 4. 中国石油西南油气田公司 蜀南气矿, 四川 泸州 646000)

**摘要:** 储层建模涉及到多种技术, 任何一项技术的改进都会对模型精度产生影响。碳酸盐岩储层在形成过程中经历成岩、构造等作用, 使储层变得复杂、非均质, 但对于孔隙层、溶洞层由张开裂缝连通的似块状储渗体构架碳酸盐岩储层来说, 孔隙层和溶洞层的分布具有规律性和旋回性。该文以四川盆地某气藏为例, 提出基于孔隙度旋回作为建模单元建立碳酸盐岩储层基质地质模型, 以达到提高储层模型精度的目的, 即寻找孔隙度曲线上的变化规律, 划分孔隙度旋回, 然后以孔隙度旋回为建模单元, 采用确定性建模和随机建模相结合的方法建立碳酸盐岩储层基质模型, 有效地提高储层模型精度。

**关键词:** 孔隙度旋回; 碳酸盐岩; 储层建模; 建模单元; 四川盆地

中图分类号: TE122.2+21

文献标识码: A

## Research on carbonate reservoir matrix model building based on porosity cycles

Tang Hong<sup>1,2</sup>, Liao Mingguang<sup>1,2</sup>, Hu Jun<sup>1,2</sup>, Jin Song<sup>3</sup>, Hu Changlong<sup>4</sup>

(1. School of Resources and Environment, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China;  
2. Sichuan Province University Key Laboratory of Natural Gas Geology in Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 3. China National Oil & Gas Exploration and Development Corporation, Beijing 100724, China;  
4. Shunan Gas Production Company, Southwest Oil & Gasfield Company, PetroChina, Luzhou, Sichuan 64600, China)

**Abstract:** Reservoir modeling refers to many technologies, and the improvements on any of which will affect model accuracy. Despite that diagenesis and tectonic factors have made carbonate reservoirs become complicated and heterogeneous, for pore or cave layer carbonate reservoirs connected by extensional fractures, the distribution of pore or cave layers has regularity and cyclicity. Taking a gas reservoir in the Sichuan Basin as an example, porosity cycle is put forward as a model unit to build up carbonate reservoir matrix geological model. Porosity cycles are divided based on the change law of porosity curves. Then with these porosity cycles, combining deterministic modeling with stochastic simulation, carbonate reservoir matrix geological model is developed to increase reservoir modeling precision.

**Key words:** porosity cycle; carbonate rock; reservoir modeling; model unit; Sichuan Basin

目前储层地质建模关键技术有很多, 主要包括: ①基于地震资料的储层建模技术; ②在储层单元合理划分的基础上对每个单元三维空间属性进行描述; ③为合理描述砂体内属性进行的后处理技术, 最终完成储层建模过程<sup>[1-4]</sup>。任何一项技术的改进都会对储层模型产生极大的影响。碎屑岩储层建模已取得长足发展, 并日趋完善<sup>[5-13]</sup>, 而碳酸盐岩储层建模却刚刚起步, 并很快成为地质建模的热点<sup>[14-18]</sup>。由于碳酸盐岩储层的形成和发育一般经历了漫长而复杂的成岩后生作用, 也遭受了多期构造运动的叠加和改造, 使碳酸盐岩储层结构、特征及

分布变得非常的复杂和非均质<sup>[19]</sup>。尽管如此, 在以孔隙为主的碳酸盐岩储层中次生孔洞的发育还是具有一定的继承性, 如原生孔隙的发育区带、构造发育区, 形成孔隙层、溶洞层由张开裂缝连通的似块状储渗体构架的碳酸盐岩储层, 因此, 孔隙层和溶洞层的分布具有规律性和旋回性。特别是像四川盆地的碳酸盐岩具有多旋回沉积特征, 其储层孔隙在纵向上出现的规律与沉积旋回密切相关<sup>[15]</sup>。

本文以四川盆地某气藏为例, 提出了基于孔隙度旋回作为建模单元建立碳酸盐岩储层基质的地质模型。

收稿日期: 2011-11-25; 修订日期: 2012-03-26。

作者简介: 唐洪(1973—), 女, 博士, 副教授, 从事油气藏描述等教学和科研工作。E-mail: thswpu@126.com。

基金项目: 四川省重点学科“矿产普查与勘探”建设项目(SDZ0414)。

## 1 气藏储层特征

四川盆地某气藏是白云岩裂缝—孔洞型底水衬托的块状气藏,根据岩性划分为4个地层单元。储层岩性为一套白云岩,其中以粒间、粒内孔亮晶藻团块白云岩、窗格孔、溶孔藻白云岩储集性能较好,晶间孔藻白云岩次之,其他较差。其储集空间主要是孔洞层,其几何形态为大、小透镜体;大透镜体至气藏外围逐渐尖灭(图1)。气藏主体区域孔洞层在横向上连续性好,分布广泛。在纵向上各孔洞层被致密白云岩所分割,若无裂缝,各层互不连通;若有裂缝连通,各孔洞层就可变成连通的整体。储层格架为孔隙层及洞穴层夹于致密白云岩中,由张开裂缝网络连通成为似块状储层。

## 2 孔隙度旋回建模单元的建立

研究区储层为一套白云岩,岩性变化小,岩性与物性的相关性也不好,所以使用岩性来划分地层有一定的困难,作为建模单元其价值也不高。尽管研究区的基质孔隙度较低,但孔洞层分布受到沉积的影响具有规律性。

### 2.1 孔隙度计算

由于研究测井资料比较老、曲线特征不够明显,因此在基质孔隙度计算中选用了最优化方法。最优化测井解释方法是以环境校正后的较为真实反映地层特征的实际测井值  $a_i$  为基础,根据合适的解释模型和测井响应方程,合理选择解释参数与储集层参数初始值,反算出相应的理论测井值  $f_i(x, a)$ ,然后与实际测井值作比较,按非线性加权最小二乘法原理建立目标函数,通过调整未知储集层参数值  $x$ ,使目标函数达到极小值。当两者充分逼近时,计算理论测井值所采用的未知量  $x$  就是充分实际储集层的参数值,即最优化测井解释结果  $x^*$ 。

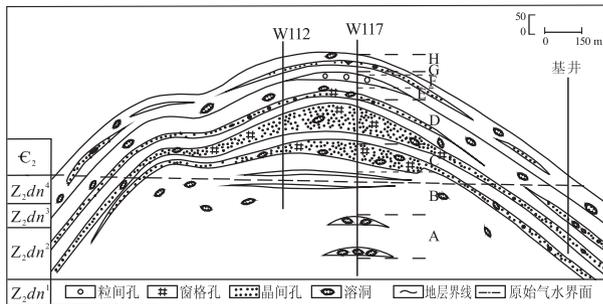


图1 四川盆地某气藏孔洞分布纵剖面  
据王允诚等<sup>[20]</sup>,有改动。

Fig.1 Pore and cave distribution profile of a gas pool in Sichuan Basin

本文主要考虑利用岩石的体积模型,在求准岩性参数  $V_{mai}(i=1,2,\dots,n)$  和泥质含量的基础上,分以下2种情况处理:

(1) 3条孔隙度测井曲线齐全,则孔隙度、含水饱和度、不同矿物百分含量等参数一起作为未知量,用最优化方法计算得出;

(2) 只有一条声波时差曲线时,利用构建的中子测井曲线,结合已有的认识求准岩性,在此基础上用声波时差曲线计算:

$$\Delta t = V_{sh} \cdot \Delta t_{sh} + \Phi \cdot \Delta t_f + (V_{ma1} \cdot \Delta t_{ma1} + \dots + V_{man} \cdot \Delta t_{man}) \quad (1)$$

式中:  $\Delta t$  为声波时差;  $V_{sh}$  为泥质含量;  $\Delta t_{sh}$  为泥质的声波时差;  $\Phi$  为孔隙度;  $\Delta t_f$  为流体的声波时差;  $V_{ma1}$  为第1类骨架含量;  $\Delta t_{ma1}$  为第1类骨架的声波时差;  $V_{man}$  为第  $n$  类骨架含量;  $\Delta t_{man}$  为第  $n$  类骨架的声波时差。

为了消除流体性质的影响,上述求解过程需经过逐步寻优的处理。

### 2.2 孔隙度旋回的划分

孔隙度旋回划分的原则:在单井上将孔隙度由低—高作为一个旋回进行划分,然后结合地层单元划分结果进行横向对比。这主要是因为单井旋回划分中可以有无数小旋回存在,而有的井由于位处构造翼部,发育的旋回较少,使单个的孔隙度旋回很难在横向上进行对比,所以在对比过程中考虑岩性地层的界限,对构造顶部井的孔隙度旋回进行合并。通过对比发现:在钻遇的地层中可以经地层划分为6个旋回,孔隙度旋回中孔隙度的变化从1%到6%~7%(图2)。

## 3 储层模型的建立

本次碳酸盐岩储层模型建立采用确定性和随机相结合的方法。首先建立构造模型,然后在构造模型的基础上,利用孔隙度旋回划分的结果建立层面模型。分析孔隙度和渗透率在空间上的变化,求取各参数的变差函数,最后以地质认识结果为约束条件,采用序贯高斯模拟方法建立孔隙度模型;在孔隙度模型的控制下,采用序贯指示模拟方法进行渗透率建模<sup>[21-23]</sup>。

### 3.1 构造模型建立

构造模型是储层地质模型的格架和基础,控制着储层结构空间形态,其好坏决定着储层模型的质量。构造模型包括层面模型和断层模型。研究区断层不发育,所以可以直接利用地震解释成果建立气藏顶面模型。在顶面模型的基础上,根据孔

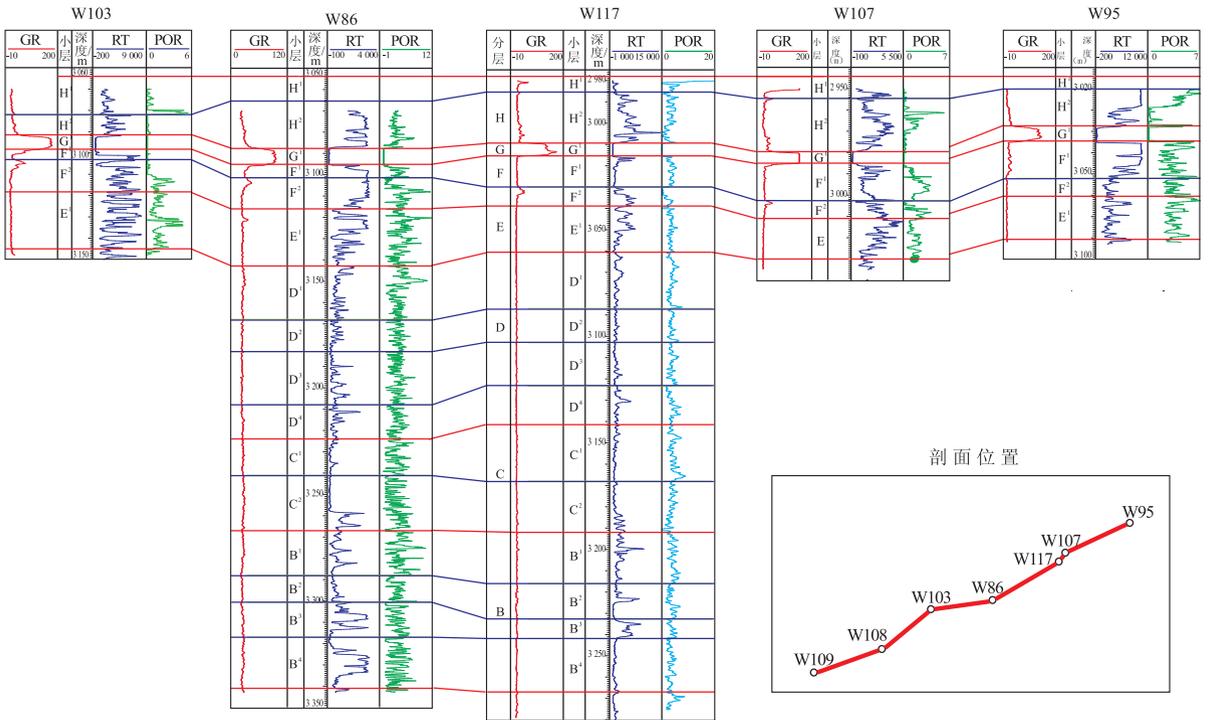


图2 四川盆地某气藏孔隙度旋回对比

Fig.2 Correlation of porosity cycles of a gas pool in Sichuan Basin

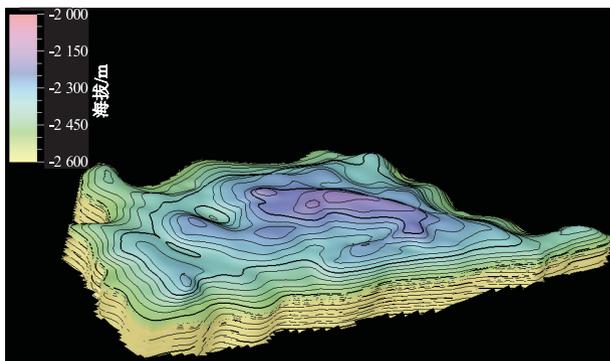


图3 四川盆地某气藏三维构造格架模型

Fig.3 3D frame model of a gas pool in Sichuan Basin

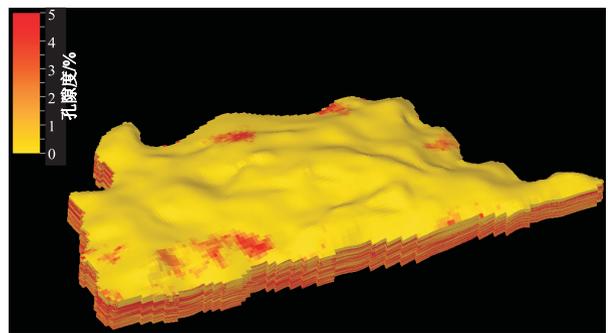


图4 四川盆地某气藏三维基质孔隙度模型

Fig.4 3D matrix porosity model of a gas pool in Sichuan Basin

气隙度旋回划分的成果进行小层层面插值,最终建立藏的三维构造模型。研究区层面有6个,在构造研究的基础上,建立了研究区的网格模型,储层建模网格的大小主要依据储层描述的精度要求并结合研究区域的大小来决定。本次建模平面网格为200 m×200 m,网格数为143×81,纵向上网格数为413,共计4 783 779个(图3)。

### 3.2 储层参数模型建立

物性参数模型是储层物性在三维空间的展布形象、直观地表达,揭示储层的内部结构及物性参数的分布特征和变化<sup>[16]</sup>。对基质孔隙度建模就是在对基质孔隙度的空间结构分析的基础上,以测井最优化解释的基质孔隙度为主变量,地质认识的孔

隙度分布趋势为协同模拟条件,采用序贯高斯协同模拟的方法建立基质的孔隙度模型(图4)。

基质渗透率是储集层特性中的关键参数,反映了气藏储层渗流能力的大小。通过对不同孔隙类型的孔隙度与渗透率的关系发现,在孔隙度大于2%的储层中,基质孔隙度与渗透率具有一定的正相关关系(图5);同时由于指示模拟适合于渗透率模拟<sup>[21]</sup>,因此选取序贯指示模拟方法,利用孔隙度模型作为次级变量,对渗透率进行协同模拟(图6)。该方法考虑了孔隙度和渗透率的关系和渗透率的奇异分布,在孔隙度旋回划分的建模单元的基础上进行,减少了储层非均质性的影响,与实际地质相符合。

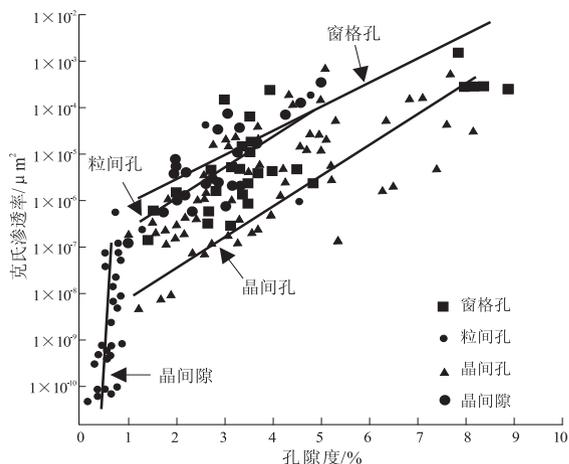


图5 四川盆地某气藏不同类型孔隙的孔渗关系

Fig. 5 Relation between porosity and permeability of different pore types in a gas pool in Sichuan Basin

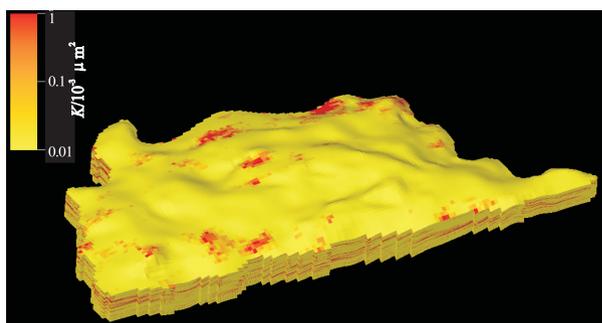


图6 四川盆地某气藏三维基质渗透率模型

Fig. 6 3D matrix permeability model of a gas pool in Sichuan Basin

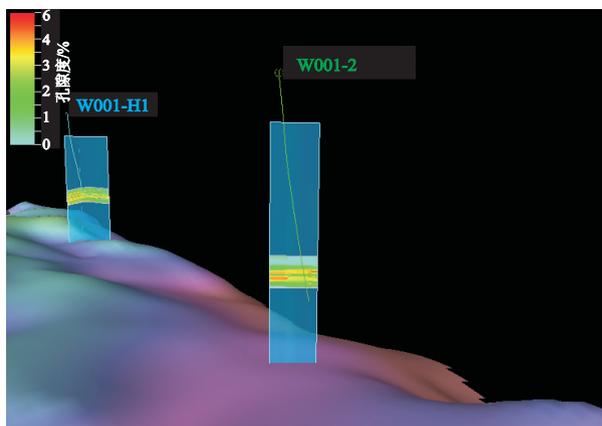


图7 四川盆地某气藏 W001-2 井轨迹及基质孔隙度剖面

Fig. 7 Trajectory of well W001-2 and matrix porosity profile of a gas pool in Sichuan Basin

### 3.3 模型验证

W001-2 井位于研究区构造西南部、主构造和西南高点的鞍部区域。其初期产量为  $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 目前产量  $(1 \sim 2) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ , 产水  $200 \text{ m}^3/\text{d}$ , 目前产量稳定。从经过该井井轨迹剖面的基质孔隙度

(图7)可以看出,该井穿过的目的层基质孔隙度较发育,井轨迹穿过储层发育段短,从目前生产状况可以说明,地质模型符合地下实际情况。

## 4 结论

储层建模涉及到多种技术,任何一项技术的改进都会对模型精度产生影响,储层地质建模人员最关注的问题之一就是储层非均质性的表征。碳酸盐岩由于储层类型的不同其表征的方法有所不同,对于以孔隙为主的碳酸盐岩储层孔隙的发育具有继承性,与沉积旋回密切关系。因此本文提出基于孔隙度旋回建立建模单元,降低了各单元间的非均质性,突出了单元内部孔隙发育区的相关性,然后采用确定性建模和随机建模相结合的方法进行气藏储层基质模型的建立,有效地提高储层模型精度,其建模结果符合地质规律,能客观反映在孔隙基础上溶蚀改造的碳酸盐岩储层的继承性和非均质性,为碳酸盐岩储层建模提供了新的研究思路。

### 参考文献:

- [1] 何登发,贾承造. 冲断构造与油气聚集[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(3): 552-62.
- [2] Finch E, Hardy S, Gawthorpe R. Discrete element modeling of contractional fault-propagation folding above rigid basement fault blocks[J]. Journal of Structural Geology, 2003, 25(4): 515-528.
- [3] Hardy S, Ford M. Numerical modeling of trishear fault-propagation folding[J]. Tectonics, 1997, 16(5): 841-854.
- [4] Allmendinger R W. Inverse and forward numerical modeling of trishear fault-propagation folds [J]. Tectonics, 1998, 17(4): 640-656.
- [5] 宋子齐,杨红刚,孙颖,等. 利用岩石物理相分类研究特低渗透储层参数建模[J]. 断块油气田, 2010, 17(6): 672-677.
- [6] 郑钊钊,刘国利,马彩琴,等. 多条件约束地质建模技术在青西油田裂缝性油藏中的应用[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(3): 77-80, 93.
- [7] 刘蕊,盛海波,蔡玥,等. 塔河油气田 AT1 区块凝析气藏三维地质建模研究[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(2): 168-171.
- [8] 高晓歌,谢麟元,齐陆宁. 建筑结构控制下的油藏属性建模[J]. 断块油气田, 2010, 17(4): 434-438.
- [9] 张永贵,刘振峰. 鄂尔多斯盆地北部上古生界致密砂岩气藏储层建模[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(4): 560-567.
- [10] 李伶俐,何生,马伟竣. 随机建模在大牛地气田新区早期气藏描述中的应用[J]. 断块油气田, 2010, 17(3): 280-284.
- [11] 丁圣,林承焰,周明晖,等. 油藏地质建模及实时跟踪研究[J]. 地球科学与环境学报, 2010, 32(1): 70-72.
- [12] 苏海芳. 井间地震资料约束技术在油藏精细建模中的应用[J]. 油气地质与采收率, 2011, 18(3): 47-48, 60.
- [13] 周炜,唐仲华,温静,等. 应用数值模拟技术研究剩余油分布规律[J]. 断块油气田, 2010, 17(3): 325-329.

体积  $V_1$  要小于 6 mL,样品室装满标准块后的自由体积  $V_2$  要小于 7 mL。

在各个参数的优化组合条件下,区分度  $Y$  可达 0.001 MPa。对于孔隙度为 5.0% 的标准样品,孔隙度测定参数优化之后,孔隙度测定值浮动范围由 4.0% ~ 6.0% 缩小到 4.8% ~ 5.3%,相对误差最大可降低 14%,绝对误差最大可降低 0.7%。

参考文献:

[1] Bustin R M, Bustin A, Ross D, et al. Shale gas opportunities and challenges [C]//AAPG Annual Convention, San Antonio, Texas, 2008.

[2] Curtis M E, Ambrose R J, Energy D, et al. Structural characterization of gas shales on the micro-and nano-scales [C]//Canadian Unconventional Resources and International Petroleum Conference, Calgary, Alberta, Canada, 2010.

[3] Sondergeld C H, Ambrose R J, Rai C S, et al. Micro-structural studies of gas shales [C]//SPE Unconventional Gas Conference, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 2010. Pennsylvania: SPE 131771. 2010:1-25.

[4] Bustin R M, Bustin A M M, Cui X, et al. Impact of shale properties on pore structure and storage characteristics [C]//SPE Shale Gas Production Conference, Fort Worth, Texas, USA, 2008. Texas: SPE 119892. 2008:1-28.

[5] 范昌育, 王震亮. 页岩气富集与高产的地质因素和过程 [J]. 石油实验地质, 2010, 32(5): 465-469.

[6] 聂海宽, 张金川. 页岩气储层类型和特征研究: 以四川盆地及其周缘下古生界为例 [J]. 石油实验地质, 2011, 33(3): 221-225.

[7] 张忠涛, 施和生, 秦成岗, 等. 番禺低隆起—白云凹陷北坡断

层封闭性研究 [J]. 断块油气田, 2010, 17(1): 24-27, 51.

[8] 王欢, 王琪, 张功成, 等. 琼东南盆地梅山组泥岩盖层封闭性综合评价 [J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(2): 152-158.

[9] 温晓红, 周拓, 胡勇, 等. 致密岩心中气体渗流特征及影响因素实验研究 [J]. 石油实验地质, 2010, 32(6): 592-595.

[10] 谢润成, 周文, 晏宁平. 致密低渗砂岩储层质量控制因素研究: 以靖边气田盒 8 段为例 [J]. 石油实验地质, 2010, 32(2): 120-128.

[11] 中华人民共和国石油天然气行业标准: SY-T5336-2006 岩心分析方法 [S].

[12] 罗蛰潭. 油层物理 [M]. 北京: 地质出版社, 1985.

[13] 秦积舜, 李爱芬. 油层物理学 [M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2006.

[14] 李先鹏. 一种改进的岩样有效孔隙度测定方法 [J]. 江汉石油学院院报, 1997, 19(2): 39-41.

[15] Ross D J K, Bustin M, Marc R. The importance of shale composition and pore structure upon gas storage potential of shale gas reservoirs [J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26: 916-927.

[16] Chalmers G R L, Bustin R M. The organic matter distribution and methane capacity of the Lower Cretaceous strata of Northeastern British Columbia, Canada [J]. International Journal of Coal Geology, 2007, 70: 223-239.

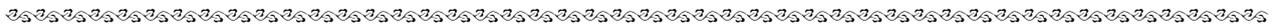
[17] 沈平平. 油层物理实验技术 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1995: 30-82.

[18] 黄延章. 低渗透油层渗流机理 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 12.

[19] 杨正明, 张英芝, 郝明强, 等. 低渗透油田储层综合评价方法 [J]. 石油学报, 2006, 27(2): 64-67.

[20] 薛定宇, 陈阳泉. 高等应用数学问题的 MATLAB 求解 [M]. 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2008.

(编辑 韩 或)



(上接第 333 页)

[14] 刘建华, 朱玉双, 胡友洲, 等. 安塞油田 H 区开发中后期储层地质建模 [J]. 沉积学报, 2007, 25(1): 110-115.

[15] 兰义飞, 王东旭. 相控建模在剥蚀残留碳酸盐岩储层中的应用 [J]. 天然气工业, 2007, 27(8): 52-53.

[16] 胡向阳, 熊琦华, 吴胜和. 储层建模方法研究进展 [J]. 石油大学学报(自然科学版), 2001, 25(1): 107-112.

[17] 刘立峰, 孙赞东, 杨海军, 等. 塔中地区碳酸盐岩储集相控建模技术及应用 [J]. 石油学报, 2010, 31(6): 952-958.

[18] 高博禹, 孙立春. 基于单砂体的河流相储层地质建模方法探讨 [J]. 中国海上油气, 2008, 20(1): 34-37.

[19] 梁积伟, 李宗杰, 刘昊伟, 等. 塔里木盆地塔河油田 S108 井

区奥陶系一间房组裂缝性储层研究 [J]. 石油实验地质, 2010, 32(5): 447-452.

[20] 王允诚, 孔金祥. 气藏地质 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 341-350.

[21] 徐景祯, 刘晓冬, 陶官仲. 渗透率建模的三维指示条件模拟方法及其应用 [J]. 石油学报, 2000, 21(3): 61-65.

[22] 兰立新. 储层地质建模技术及其在油藏描述中的重要性: 以南堡油田为例 [J]. 西北大学学报(自然科学版), 2006, 36(6): 988-991.

[23] Deuth C V. Geostatistical Reservoir Modeling [M]. New York: Oxford University Press, 2002: 4-10.

(编辑 徐文明)