

松辽盆地北部泉三、四段低渗透储层孔隙度演化史

刘贵满¹, 孟元林², 魏巍²

1. 中国石油辽河油田公司 锦州采油厂, 辽宁 锦州 121209; 2. 东北石油大学 地球科学学院, 黑龙江 大庆 163318

摘要:为了预测松辽盆地北部泉三、四段储层的孔隙度、恢复孔隙演化史,本文综合考虑沉积相和成岩作用对储层孔隙度的影响,建立了孔隙度关于沉积相指数、成岩指数和深度等多因素非线性模型,预测了泉四段储层的孔隙度,恢复了孔隙演化史。结果表明,在泉四段储层填隙物高达16%的条件下,孔隙度预测的平均绝对误差仅为1.84%;在碎屑岩埋藏的早期,储层孔隙度主要受沉积相的影响,在晚期则受成岩作用的控制,次生孔隙主要发育在中成岩阶段A₁亚期和A₂亚期的早期;同一层位的储层孔隙度从古到今逐渐减小,在松辽盆地北部的主要成藏期(嫩江期末),中央坳陷泉四段Sq₁的储层主要属于中~高孔隙度储层,有利于油气藏的形成,在明水组沉积的后期才变为致密储层。

关键词:储层;成岩作用;孔隙度预测;孔隙演化史;低渗透储层;致密砂岩气;松辽盆地

中图分类号:P618.130.2⁺¹ **文献标识码:**A **文章编号:**1007-2802(2012)03-0266-09

Porosity Evolving History of Low Permeability Reservoirs in the Third and the Fourth Members of the Quantou Formation in the Northern Songliao Basin

LIU Gui-man¹, MENG Yuan-lin², WEI Wei²

1. Jinzhou petroleum production plant of Liaohe Oil Field Company Ltd., Petro China, Panjin 121209, China;

2. Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China

Abstract: In order to predict porosities of the low permeability reservoirs of the Third and the Fourth Members of the Quantou Formation in the Northern Songliao Basin and to restructure the porosity evolving history of these reservoirs, this study established a new multi-factors (including sedimentary facies index, diagenesis index and depth) non-linear model. The reservoir porosity of the Fourth Member of the Quantou Formation in the Northern Songliao Basin was predicted and the porosity evolving history was restructured using this new model. The results show that the averaged absolute error of the predicted porosities is 1.84% for the reservoirs with pore-filling rates up to 16%, and that the porosity was dominantly effected by sedimentary facies during the early burial time and was mainly controlled by diageneses during the late burial time, and that the secondary porosity was developed in stages of the middle diagenetic stage A₁ and the early middle diagenetic stage A₂, and that the porosity decreased gradually from ancient times to the present, and that the reservoir in the Sq₁ of the Fourth Member of the Quantou Formation in the Central Depression was middle-high porosity reservoir at the time of oil and gas pool forming in the Northern Songliao Basin but became tight sandstones after the middle time of Mingshui Formation deposition.

Key words: reservoir; diagenesis; porosity prediction; porosity evolving history; low permeability reservoir; tight sandstone gas; Songliao Basin

随着世界能源日趋紧张,低渗透油气田以及致密砂岩气的勘探开发已成为全球石油工业发展的主要趋势之一^[1]。钻前储层质量预测(Predrilling Reservoir Quality Prediction)就成为储层地质界的一个研究热点,国外储层孔隙度预测模型主要为多元线

性模型,适用于储层填隙物含量小于10.0%、孔隙度预测误差小于2.0%的情况^[2-5]。但我国陆相盆地碎屑岩储层,尤其是低渗透储层和致密砂岩的填隙物含量一般大于10.0%,因此国外的孔隙度预测模型不适用于我国陆相沉积盆地。国内相关研究起

收稿日期:2011-06-05 收到,07-04 改回

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40872076);黑龙江研究生创新科研基金(YJSCX2011-18HJ);全国油气资源战略选区调查与评价国家资助专项(2009GYXQ13)

第一作者简介:刘贵满(1961-),男,高级工程师,研究方向:储层与石油地质研究。E-mail:qhdmlyl@163.com.

步较晚,但近年来发展较快,许多学者从不同的角度建立了各种储层孔隙度预测模型^[6-12],这些模型适用于储层填隙物含量大于10%、孔隙度预测误差在2.0~3.0%之间的储层,并且主要预测现今储层孔隙度,对地史时期储层的孔隙度预测研究较少。在成藏动力学研究和油气勘探中,人们除了需要在钻井前了解现今储层的孔隙度之外,还迫切需要了解储层在成藏时期的孔隙度以及在整个地史时期储层孔隙演化史^[4,13-15]。本文试图综合考虑沉积相和成岩作用对储层孔隙度的影响,建立适用于储层填隙物含量大于10%、孔隙度预测精度更高的模型,在预测现今储层孔隙度的同时,以埋藏史和成岩史模拟为基础,恢复储层的孔隙演化史,为松辽盆地以及其它盆地低渗透储层、致密砂岩的勘探提供科学依据。

1 区域地质概况与储层特征

松辽盆地位于我国东北部,是一个中、新生代大型内陆湖盆,其中白垩系厚度最大,是松辽盆地勘探开发的主要目的层段,自下而上分为火石岭组(K_{1h})、沙河子组(K_{1sh})、营城组(K_{1yc})、登娄库组(K_{1d})、泉头组(K_{2q})、青山口组(K_{2qn})、姚家组(K_{2y})、嫩江组(K_{2n})、四方台组(K_{2s})和明水组(K_{2m})。泉头组二段以下、埋深大于2500 m的地层为深层^[13]。根据中浅层的构造和地层特征,结合深层构造和基底性质,松辽盆地北部可划分为北部倾没区、西部斜坡区、中央拗陷区、东北隆起区、东南隆起区5个一级构造单元^[13](图1),中央拗陷区是松辽盆地北部油气聚集的主要地区。

本文主要研究松辽盆地泉头组三、四段,发育于其中的油气层分别称为扶余油和杨大城子油层,简称扶杨油层。其油来自上覆的青山口组暗色泥岩,属于顶生式生、储、盖组合,是松辽盆地五个含油气组合中的下部含油气组合。扶杨油层是一套河流-湖泊-三角洲相红色细砂岩和极细砂岩沉积,岩性以长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩为主。1108口井的薄片镜下鉴定结果表明^[16],石英碎屑颗粒、长石碎屑颗粒和岩屑的平均含量分别为28%、41%、31%;岩屑以中酸性喷发岩为主,占岩屑总量的80%以上。储层的填隙物主要为方解石和泥质,其次为自生石英、长石和少量浊沸石及铁质,填隙物总量主要分布在9%~19%之间,平均16%。扶杨油层具有单层厚度小、埋藏深、成岩作用强、物性差、产能低的特征。在中央拗陷区,泉三、四段储层埋藏较深,最深可以超过2500m以上,成岩作用较强,

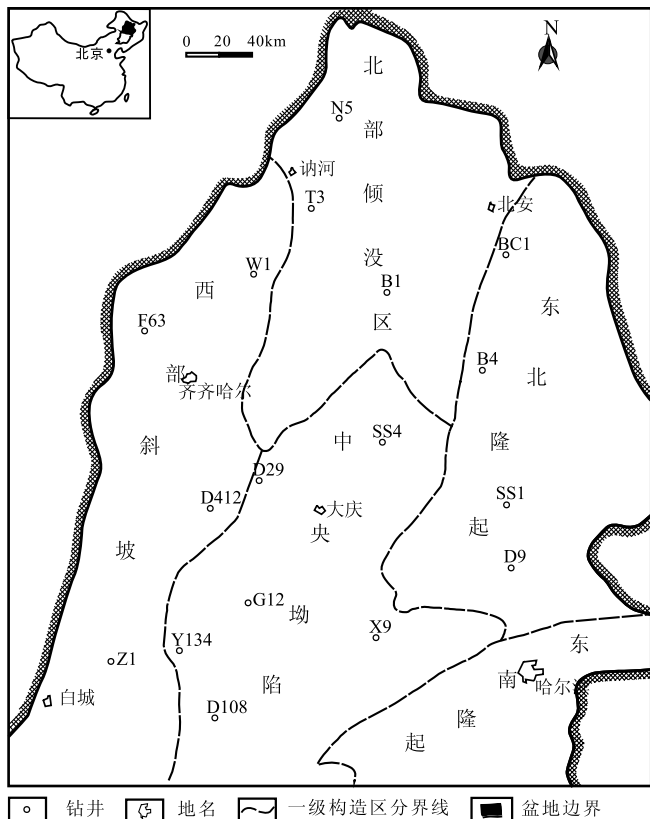


图1 松辽盆地北部构造分区
Fig. 1 Tectonic units in the middle-shallow horizons of the northern Songliao basin

储层目前已进入中成岩阶段B期^[16,17](表1),孔隙度范围为1.21%~15.12%,平均10.09%,主要为低孔隙度储层,在拗陷中心则发育孔隙度<10%的致密砂岩;渗透率范围 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 \sim 70.70 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均 $1.09 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,是典型的(特)低渗透油气藏。

为了从整体上研究泉三、四段储层的沉积特征和油气聚集规律,依据松辽盆地北部所有的钻井和地震资料^[18],在泉三段内部划出Q3~Sq1、Q3~Sq2、Q3~Sq3、Q3~Sq4、Q3~Sq5五个四级层序,泉四段内部自下而上划出Q4~Sq1、Q4~Sq2、Q4~Sq3三个四级层序。平面上看,从盆地边部到中心,该储层依次发育冲积扇、辫状河、曲流河、三角洲平原、三角洲前缘和滨浅湖相。

2 沉积相和成岩作用对储层孔隙度的影响

研究表明,碎屑岩储层的孔隙度主要受沉积相和成岩作用的共同影响与控制^[8,19-21],沉积相是影响储层孔隙度的“先天”因素,控制着储层的原始孔隙度和空间分布;成岩作用是影响储层孔隙度的“后

表1 松辽盆地北部泉三、四段储层成岩阶段划分与主要成岩特征^[16]Table 1 The diagenetic stage division and the major diagenetic characteristics of the Third and Fourth Members of the Quantou Formation in the northern Songliao basin^[16]

成岩阶段	成岩相	I_0	古温度/℃	有机质		泥岩 I/S 中/S/%	地层水 有机酸	砂岩中自生矿物										溶解作用	接触类型	主要孔隙类型	深度/m
				Ro/%	SI			V_q /%	蒙皂石	伊蒙混层	高岭石	伊利石	绿泥石	方解石	长石加大	钠长石化	硬石膏				
早成岩	A 早期压实相	0.26	65	0.4	0.2	65		1											原生孔	400	
	B 早期胶结相	0.34	85	0.5	0.28	45		2											点状	900	
中成岩	A ₁ 早期溶蚀相	0.46	100	0.7	0.4	35		3											次生 原生孔	1300	
	A ₂ 中期溶蚀相	0.63	120	1.1	0.47	20		4.5										点—线		2120	
	晚期溶蚀相	0.71	140	1.3	0.56	15		6											2300		
	B 晚期胶结相	1.0	175	2.0	>0.56	5		15										线状	次生孔 裂缝	>2300	

注: I_0 是成岩指数(具体定义容后述之);SI为 C_{20} 甾烷 $S/R+S$; V_q 代表砂岩中自生石英的含量, %

天因素”,决定了储层的最终孔隙度。为了定量研究沉积相和成岩作用对储层质量的影响,本文应用150口井的2764组物性数据,详细统计了松辽盆地北部泉三、四段不同成岩阶段对应各种沉积相的储层孔隙度(表2)。表2中的砂岩储层孔隙度分类主要采用了石油与天然气行业标准^[22],根据松辽盆地泉三、四段工业油流储层的孔隙度下限9.00%^[13],将低孔隙度砂岩的孔隙度下限调为9.00%。

2.1 沉积相对储层孔隙度的影响与定量研究

2.1.1 沉积相对储层孔隙度的影响

为了更详尽地研究沉积相对储层孔隙度的影响,本文分成岩阶段统计了处于不同沉积相的储层孔隙度(表2)。这样,就可以在成岩强度相近的条件下,单独研究沉积相对储层孔隙度的影响,其原理如同数学分析中求偏导数一样,固定一个自变量,考察另一个自变量对函数的影响。

由表2可见,在同一成岩阶段,沉积相对储层孔隙度具有明显的控制作用,如:同处于中成岩阶段A₂亚期、发育晚期溶蚀相的储层,水动力较强的水上分流河道和水上分流河道砂体的孔隙度较高,分别为9.74%和9.16%,大于9.00%,仍可产出工业油流;水动力相对较弱的三角洲平原和前缘沉积相的孔隙度较低,分别为8.35%和7.36%,二者均小

于9.00%,在目前的技术条件下,难以大量产出具有工业价值的油流。这一结论对盆地中央坳陷中心岩性油气藏的勘探具有重要指导意义。

2.1.2 储层孔隙度与沉积相指数的关系

为了定量研究沉积相对储层孔隙度的影响,本文引入了沉积相指数 I_F 的概念:

$$I_F = \Phi_i / \Phi_{\max} \quad (1)$$

式中: Φ_i 为处于同一成岩阶段中不同沉积相储层的孔隙度(%); Φ_{\max} 为处于该成岩阶段中具有最高孔隙度的某一沉积相砂体的孔隙度(%)。

由于在储层埋藏的早期,孔隙度主要受沉积相的控制(容后述之),所以在计算沉积相指数时,尽量选取成岩作用相对较弱、且沉积相发育齐全的同—成岩阶段不同沉积相的储层,以便较好地反映沉积相对储层孔隙度的影响。松辽盆地北部泉三、四段在中成岩阶段A₁亚期的沉积相类型齐全、且成岩作用相对较弱,因此本文应用中成岩阶段A₁亚期中各沉积相砂体的孔隙度计算了沉积相指数。水下分流河道储层的孔隙度在中成岩阶段A₁亚期储层的孔隙度最高,为19.92%,因此取 $\Phi_{\max} = 19.92\%$ 。由式(1)计算得水下分流河道、曲流河主河道、曲流河沉积、水上分流河道、三角洲平原和三角洲前缘的 I_F 分别为1、0.964832、0.888379、0.841998、

0.736493 和

表2 沉积相和成岩作用对泉三、四段储层孔隙度的综合影响

Table 2 The integrated effects of sedimentary facies and diageneses on reservoir porosities of the Third and Fourth Members of the Quantou Formation

成岩阶段 (成岩相)	沉积相	平均孔隙度 (%)	储层物性分类
早成岩 A (早期压实相)	曲流河主河道	28.76(48)	I
	曲流河沉积	23.24(20)	
	辫状河沉积	18.64(26)	
早成岩 B (早期胶结相)	曲流河主河道	24.65(98)	II
	水上分流河道	22.63(122)	
	曲流河沉积	21.54(81)	
	三角洲平原	20.76(66)	
中成岩 A ₁ (早期溶蚀相)	水下分流河道	19.62(146)	II
	曲流河主河道	18.93(78)	
	曲流河沉积	17.43(228)	
	水上分流河道	16.52(122)	
	三角洲平原	14.45(158)	
	三角洲前缘	13.63(93)	
中成岩 A ₂ (中期溶蚀相)	水上分流河道	14.25(111)	III
	曲流河主河道	13.23(218)	
	水下分流河道	13.11(73)	
	曲流河沉积	12.24(181)	
	三角洲平原	11.45(30)	
中成岩 A ₂ (晚期溶蚀相)	三角洲前缘	10.13(35)	III
	水上分流河道	9.74(111)	
	水下分流河道	9.16(91)	
	三角洲前缘	8.35(56)	
中成岩 B (晚期胶结相)	三角洲平原	7.36(74)	IV
	水上分流河道	8.15(135)	
	水下分流河道	7.63(241)	
中成岩 B (晚期胶结相)	三角洲平原	6.19(58)	IV
	三角洲前缘	5.86(64)	

注:① I-高孔($\Phi > 25\%$), II-中孔($\Phi = 15\% \sim 25\%$), III-低孔($\Phi = 9\% \sim 15\%$), IV-特低孔($\Phi < 9\%$); ② (Φ)中的数据是样品数; ③根据各实测孔隙度对应的深度,依据表1确定其所属的成岩阶段和成岩相; ④曲流河沉积泛指主河道以外河流沉积所形成的砂体,包括堤岸和河漫沉积。三角洲平原和三角洲前缘也泛指分流河道以外的沉积。

0.694699。当 $I_F = 1$ 时,该沉积相对应的储层孔隙度最高。由此可见, I_F 是表征沉积相对储层孔隙度影响程度的一个参数,随着 I_F 的减小,对应的储层孔隙度逐渐降低。

由于不同沉积相砂体的成分成熟度不同,所以其抗压性不同^[8,19]。在埋藏成岩过程中,表现为不同沉积相砂体的孔隙度随深度增加,衰减速率不

同^[19]。考虑沉积相以及深度对储层孔隙度的影响,应用 498 组实测孔隙度数据,建立了松辽盆地北部泉三、四段储层孔隙度关于沉积相指数和深度的指数函数:

$$\Phi = I_F \times 37 \times e^{-0.000507094z} \quad (2)$$

式中: z 为深度(m); 相关系数 $R = 0.70$ 。

2.2 成岩作用对储层孔隙度的影响与定量表征

2.2.1 成岩作用对储层孔隙度的影响

使孔隙度增加的成岩作用称为建设性成岩作用,常见的建设性成岩作用有溶蚀作用、重结晶作用等;使孔隙度减小的成岩作用称为破坏性成岩作用,常见的破坏性成岩作用有压实作用、胶结作用和交代作用等。由表2可见,松辽盆地北部成岩作用对泉三、四段储层孔隙度具有很重要的控制作用。总体上看,随埋深增加,成岩作用增强,孔隙度减小,这是松辽盆地北部泉三、四段储层孔隙度变化的基本规律(表2)。尽管沉积相对储层孔隙度有明显影响,但并没有从根本上改变随埋深增加,成岩作用增强,储层孔隙度减小的趋势,从早成岩阶段 A 期、B 期,经中成岩阶段 A₁ 亚期和 A₂ 亚期,到中成岩阶段 B 期,储层由高孔隙度(I)、中孔隙度(II),经低孔隙度(III),变为特低孔隙度(IV)。尤其是当储层进入中成岩阶段 B 期,发育晚期胶结相时,无论什么沉积相的砂体,其孔隙度均小于 9.00%,低于泉三、四段砂岩储层工业油层的孔隙度下限,难以产出工业油流(表2)。

2.2.2 成岩作用数值模拟与成岩阶段预测

为定量研究成岩作用对储层孔隙度的影响,本文综合考虑温度、压力、流体和时间四种因素对成岩作用的影响,选取成岩阶段划分常用而且在目前的技术条件下可以定量模拟的成岩指标古地温 T 、镜质组反射率 R_o 、甾烷异构化指数 $SI(C_{29} \text{甾烷 } S/S+T)$ 、粘土矿物伊/蒙混层中蒙皂石的含量 $S\%$ 和自生石英含量 $V_q\%$ 这五项参数作为成岩作用过程综合模拟的主要参数,在恢复埋藏史的基础上,分别模拟 T 、 R_o 、 SI 、 S 、 V_q 随时间的变化规律^[23~27],然后将它们加以组合,构建了一个能够反映成岩强度的定量化参数—成岩指数 I_D :

$$I_D = \sum_{i=1}^n P_i \times Q_i / \max Q_i \quad (3)$$

式中: I_D 为成岩指数; n 为成岩指标的个数, $n = 5$; Q_i 为第 i 个成岩指标模拟计算的结果,如镜质组反射率、古地温等; $\max Q_i$ 为第 i 个成岩指标在中成岩阶段 B 末期的最大值,其中古地温、镜质组反射率、甾烷异构化指数、粘土矿物伊/蒙混层中蒙皂石的含

量、自生石英含量分别取 175℃、2.00%、0.56、5%、15% (表 1); P_i 为第 i 个成岩指标的权值,其总和为 1.0,本文分别取 T 、 R_0 、 SI 、 S 、 V_q 的权值为 0.2、0.5、0.1、0.1、0.1,权值的大小主要根据其相对重要性确定^[11,28]。其中 R_0 是成岩阶段划分最重要的指标,具有灵敏度高、实测数据丰富、在各沉积盆地中可比性强等优点,尽管各盆地在计算成岩指数时,取值有所差异,但其所占的权重均最大,本文取 0.5;古地温与成岩作用的关系也比较密切,取其权重为 0.2;粘土矿物转化、甾烷异构化反应和自生石英含量在成岩阶段划分中所起的作用相当,因此取其权值相对较低,均为 0.1。由于甾烷异构化反应在 $R_0 = 0.8\%$ 以后就达到平衡,所以在中成岩阶段 A_1 亚期之后,其权值为 0.0,而粘土矿物转化和自生石英形成的权值分别增至 0.15。

由上式可见, $I_D = 0.00$ 时,成岩作用刚开始, $I_D = 1.00$ 时,中成岩阶段 B 期结束;当 $I_D > 1.00$ 时,进入晚成岩阶段,其他各成岩阶段对应的 I_D 见表 1。这样,就实现了碎屑岩成岩阶段划分的数值化。

计算成岩指数时,首先以地震资料和钻井资料为基础,建立松辽盆地北部的成岩作用数值模拟网络,网络中各模拟点(人工井)的间距为 1 km,然后,应用我们自编的成岩作用数值模拟系统软件^[10,29],模拟网络中各模拟点的古埋深 z 、古地温 T 、镜质组反射率 R_0 、甾烷异构化指数 SI 、伊/蒙混层中蒙皂石层的含量 $S\%$ 、自生石英含量 $V_q\%$ 随时间的变化规律,计算出各模拟点不同地质时期不同层位的成

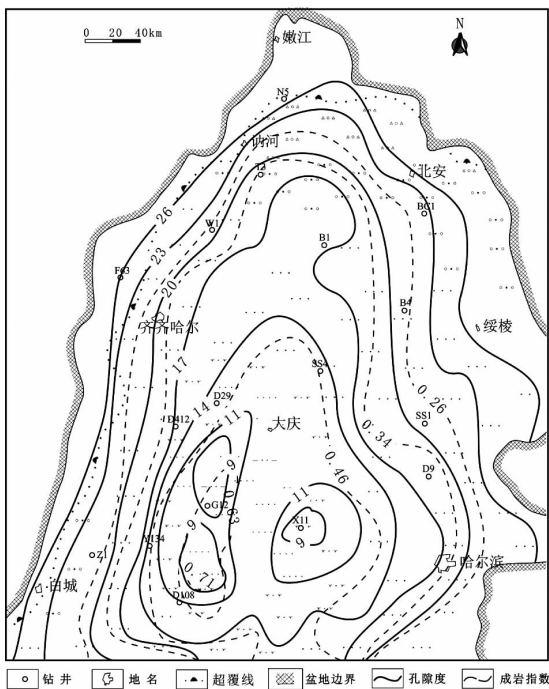


图 2 现今泉四段 S_{q1} 储层孔隙度预测图

Fig. 2 Predicted present reservoir porosity of S_{q1} of the Fourth Member of the Quantou Formation

岩指数 I_D (式 3), 得出不同地质时期各层位的 I_D 等值线图(图 2 ~ 图 5)。需要补充说明的是,古埋深直接由埋藏史模型在恢复古厚度之后累加求得,埋藏史模型有正演模型和反演模型两种,本文使用的是正演模型^[23]。成岩作用数值模拟所需的输入参数与盆地模拟所需的参数相似,主要包括地层的年代、厚度、岩性、矿物成分、剥蚀量、古地表温度、古水深、岩石热导率等,取自前人的研究结果^[13,30]。

2.2.3 孔隙度与成岩指数的关系 应用泉三、四段 498 组储层实测孔隙度数据及其对应的成岩指数 I_D 的关系,可得二者具有良好的相关性(图 6)。由图可见,随成岩作用的增强,成岩指数 I_D 逐渐增加,孔隙度逐渐降低,并可用下式表示:

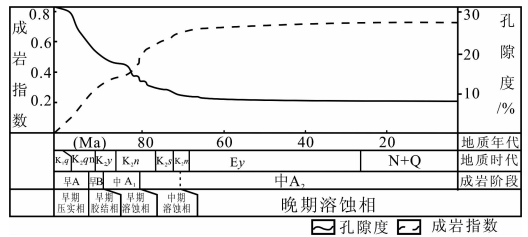


图 3 X11 井泉四段 S_{q1} 储层成岩演化史与孔隙演化史图

Fig. 3 Diagenetic history and reservoir porosity evaluation history of the fourth member of Quantou Formation for X11 well

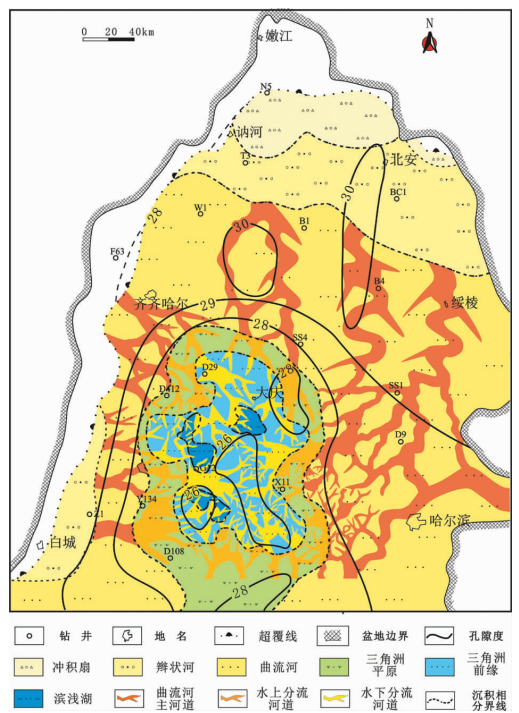


图 4 泉头期末泉四段 S_{q1} 储层孔隙度预测图

Fig. 4 Predicted reservoir porosity of Sq1 of the Fourth Member of the Quantou Formation at the end of Quantou Perio at the end of Quantou Perio

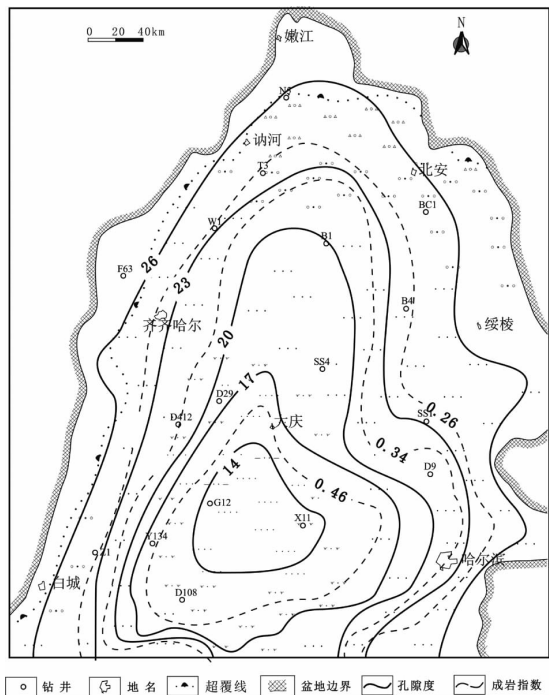


图5 嫩江期末泉四段Sq1储层孔隙度预测图
Fig. 5 Predicted reservoir porosity of Sq1 of the fourth member of Quantou Formation at the end of Nenjiang Period

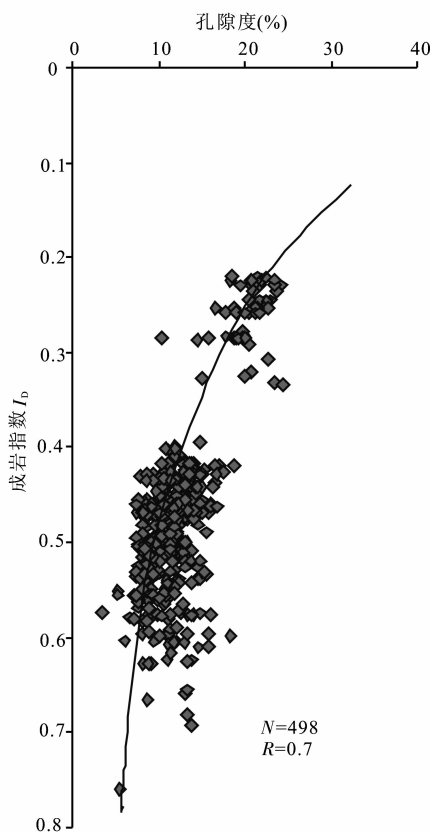


图6 泉三、四段储层实测孔隙度与成岩指数关系图
Fig. 6 Relationship between predicted reservoir porosity and I_D of the Third and Fourth Members of the Quantou Formation

$$\Phi = 37.99 \times e^{-2.124240I_D} \quad (4)$$

式中： I_D 为成岩指数；相关系数 $R = 0.78$ 。

2.3 孔隙度预测模型

为综合考虑沉积相和成岩作用对储层孔隙度的影响,本文将上述两个孔隙度与成岩指数 I_D 和沉积相指数 I_F 相关模型(式3、式4)进行了复合处理,通过回归,构建了一个新的多因素非线性孔隙度预测模型:

$$\Phi = 0.54 \times (I_F \times 37 \times e^{-0.000507094z} + 0.53 \times (37.99 \times e^{-2.124240I_D}) - 0.9 \quad (5)$$

498组实测数据的孔隙度预测结果表明,松辽盆地北部泉三、四段的实测孔隙度与预测孔隙度之间具有良好的相关性, $R = 0.83$, 相关系数比式(2)和式(4)有了进一步提高。实测孔隙度与预测孔隙度之间绝对误差平均为1.88% (图7), 达到国际上储层填隙物含量小于10%时,孔隙度预测误差小于2.00%的标准^[2~4]。然而,泉三、四段储层填隙物平均含量为16%,远高于国外储层填隙物含量小于10%的限制。也即本文所建立的孔隙度预测模型在储层填隙物含量高达16%的条件下,达到储层孔隙度预测误差小于2.00%的水平,其适用范围比国外同类模型更广,其精度比国内同类模型更高。

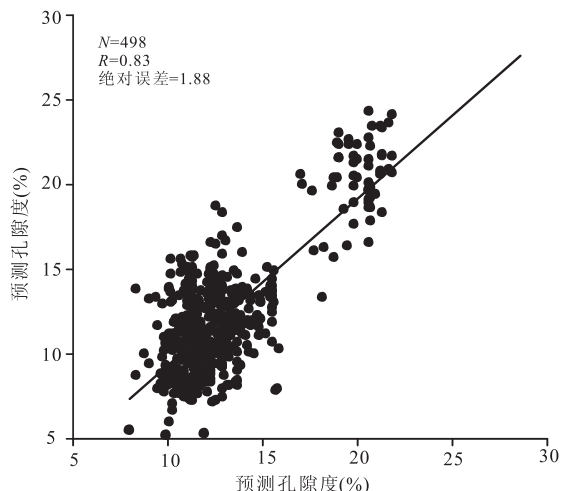


图7 预测孔隙度与实测孔隙度的相关性
Fig. 7 Relationship between predicted and measured porosities

3 现今储层孔隙度预测

在成岩作用数值模拟、计算 I_D 的基础上,结合

层序地层学和沉积相的研究成果,应用孔隙度预测模型(式5),即可在钻前预测各模拟点现今储层的孔隙度,并编绘等值线图。限于篇幅本文仅给出泉四段 $Sq1$ 储层的现今孔隙度预测图(图2)。由图可见,泉四段 $Sq1$ 储层孔隙度主要与成岩作用有关,孔隙度等值线的延伸方向几乎与成岩指数等值线的延伸方向平行。从松辽盆地边部到中心,成岩作用逐渐增强,储层孔隙度逐渐减小,松辽盆地边缘的储层处于早成岩阶段 A 期($I_D < 0.26$),平均孔隙度可达 20% 以上,属于中高孔隙度储层;盆地中央储层大部分处于早成岩阶段 B 期($0.26 \leq I_D < 0.34$) - 中成岩阶段 A_1 亚期($0.34 \leq I_D < 0.46$),平均孔隙度主要分布在 14% ~ 23% 之间,主要属于中孔隙度储层;盆地中心的储层处于中成岩阶段 A_2 亚期($0.46 \leq I_D < 0.71$) - B 期($I_D \geq 0.71$),平均孔隙度主要分布在 9% ~ 14%,属于低孔隙度储层,在目前的技术条件下,可以产出工业油流。但在盆地埋藏最深的古龙和三肇地区的 G12 井和 X11 井周围,泉四段 $Sq1$ 储层埋藏较深,成岩作用较强,孔隙度小于 9%,属于特低孔隙度储层或致密储层,不能产出工业油流,但可以产出致密砂岩气。

统计表明,泉四段 $Sq1$ 储层 68 口井 83 组实测孔隙度与图 2 模拟孔隙度之间绝对误差的平均值为 1.84%,低于国际上储层孔隙度预测绝对误差小于 2% 的标准。

4 储层孔隙演化史模拟

4.1 古孔隙度计算的基本原理

沉积相是决定储层孔隙度的“先天因素”,一个沉积体系中各种沉积相在地质时期一旦形成,将不再发生变化,如:曲流河主河道相从古到今无论埋深发生什么变化它都是曲流河主河道相,其沉积相指数 I_F 在地史时期保持恒定;而成岩作用是决定储层孔隙度的“后天因素”,沉积物形成后,随以后埋深、温度、压力等地质因素的变化,成岩强度逐渐增强, I_D 逐渐增加,储层孔隙度不断变化。因此通过成岩作用数值模拟,计算出各模拟点在不同地质时期的古埋深 z 和成岩指数 I_D ,应用孔隙度预测模型(式5),便可计算各模拟点在不同地质时期的储层孔隙度,恢复储层的孔隙演化史。

4.2 单井储层孔隙演化史模拟

图 5 是位于中央拗陷 X11 井的泉四段 $Sq1$ 储层从沉积开始到现今的成岩史和孔隙演化史。由图可见,在埋藏初期的青山口组沉积时期(K_1qn)和姚家

组沉积早期(K_1y),X11 井泉四段 $Sq1$ 储层孔隙度衰减最快,这一时期储层主要处于早成岩阶段 A 期和 B 期, $I_D < 0.34$,碎屑岩主要发育早期机械压实和胶结相,溶蚀作用不发育,原生孔隙迅速减小。在姚家组沉积晚期,储层已经进入中成岩阶段 A_1 亚期,烃源岩进入生油门限,开始生烃,同时产生有机酸,溶蚀储层中的硅铝酸盐和碳酸盐矿物,形成次生孔隙,储层孔隙度有所增加。在嫩江组沉积中晚期储层已经进入中成岩阶段 A_2 期的中期溶蚀相,溶蚀作用更加强烈,正是由于溶蚀作用的发生,使得孔隙度在姚家期(K_2y)和嫩江期(K_2n)出现波浪式增加的趋势,泉四段 $Sq1$ 储层孔隙度大于 10%。但在明水组沉积后期,X11 井进入中成岩阶段 A_2 期的晚期溶蚀相, $I_D > 0.63$, $R_o > 1.1\%$,泥岩中有机酸的生成量减小,溶蚀作用减弱,泉四段储层孔隙度小于 9%,形成致密储层。此后,松辽盆地开始褶皱回返^[13],大地热流和地温梯度降低,成岩演化减缓,储层孔隙度随埋深缓慢减小,直到现今的 7.5% 左右,形成致密砂岩。

4.3 地史时期储层孔隙度平面预测

不同地质时期泉四段 $Sq1$ 储层孔隙度预测结果表明(图 2、图 4、图 5),同一层段储层孔隙度从古到今逐渐减小,且能产出工业油流的有效储层(孔隙度 $> 9\%$)的分布面积也随之缩小。在泉头期末,松辽盆地北部泉四段 $Sq1$ 储层处于早成岩阶段 A 期(图 4), $I_D < 0.26$,成岩作用较弱,储层孔隙度较高,大部分地区的储层孔隙度大于 26%(图 4),属于高孔隙度储层,而且储层孔隙度的大小与成岩作用关系不大,主要与沉积相有关,在盆地边缘边部的辫状河与曲流河发育区,泉四段 $Sq1$ 储层孔隙度较高,一般大于 29%,而在中央拗陷区的三角洲平原和三角洲前缘,储层孔隙度相对较小,一般处于 26% ~ 29%,属于中孔隙度储层。孔隙度等值线的形态与现今沉积相的平面展布相似(图 4)。嫩江期末是松辽盆地北部泉三、四段的主要成藏期^[13],泉四段 $Sq1$ 储层的孔隙度主要分布在 14% ~ 26% 之间(图 5),整体上属于中-高孔隙度储层,十分有利于油气藏的形成。成岩作用对储层孔隙度具有明显的控制作用,孔隙度等值线与成岩指数 I_D 等值线的变化规律基本相同。从盆地边部到中心,泉四段 $Sq1$ 由早成岩阶段 A($I_D < 0.26$),经早成岩阶段 B 期($0.26 \leq I_D < 0.34$)和中成岩阶段 A_1 亚期($0.34 \leq I_D < 0.46$),到达中成岩阶段 A_2 亚期($I_D \geq 0.46$),储层孔隙度由大于 26%,演化到孔隙度小于 14%(图 5)。国内

一般把孔隙度低于 10% 的储层称为致密储层^[31]。由图 5 可见,油气藏形成时,泉四段 *Sq1* 储层并不致密,而是在成藏后不断埋深的过程中,才逐渐变得致密。

5 结 论

(1) 本文综合考虑沉积相和成岩作用所建立的多元非线性孔隙度预测模型,在储层填隙物高达 16% 的条件下,孔隙度预测的绝对误差仅为 1.84%,该模型的适用范围比国外的孔隙度预测模型更广,预测误差比国内同类模型更小。

(2) 泉四段储层孔隙度在埋藏早期主要受沉积相影响,晚期主要受成岩作用影响。

(3) 松辽盆地北部中央拗陷只有古龙地区和三肇地区泉四段 *Sq1* 的储层属于致密储层,中央拗陷的其他地区为低孔隙度储层。

(4) 在松辽盆地北部的主要成藏期(嫩江期末),中央拗陷的泉四段 *Sq1* 的储层主要属于中~高孔隙度储层,有利于油气藏的形成,在明水组沉积的后期才变为致密储层。

参考文献 (References):

[1] 胡文瑞. 中国低渗透油气的现状与未来[J]. 中国工程科学, 2009, 11(8): 29-37.
Hu Wenrui. The present and future of low permeability oil and gas in China[J]. Engineering Science, 2009, 11(08): 29-37. (in Chinese with English abstract)

[2] Byrnes A P. Empirical methods of reservoir quality prediction. Reservoir quality assessment and prediction in clastic rocks[J]. SEPM Short Course, 1994, 30: 10-21.

[3] Bloch S, Helmod K P. Approaches to predicting reservoir quality in sandstones. AAPG Bulletin, 1995, 79: 97-115.

[4] Kupecz J A, Gluyas J, Bloch S. Reservoir quality prediction in sandstones and carbonates: An overview [J]. AAPG Memoir, 1997, 69: vii - X X iv.

[5] Ajdukiewicz J M, Nicholson P H, Esch W L. Prediction of deep reservoir quality using early diagenetic process models in the Jurassic Nophlet Formation, Gulf of Mexico [J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(8): 1189-1227.

[6] 武文来, 周士科. 渤海海域深部碎屑岩储层孔隙度预测[J]. 中国海上油气(地质), 1997, 11(4): 241-248.
Wu Wenlai, Zhou Shike. The predicting porosity of deep clastic reservoirs in Bohai Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 1997, 11(4): 241-248. (in Chinese with English abstract)

[7] 寿建峰, 朱国华. 砂岩储层孔隙保存的定量预测研究[J]. 地质科学, 1998, 33(2): 244-249.
Shou Jianfeng, Zhu Guohua. Study on quantitative prediction of porosity preservation in sandstone reservoirs[J]. Scientia Geologica Sinica, 1988, 33(2): 244-249. (in Chinese with English

abstract)

[8] 寿建峰, 张惠良, 斯春松. 砂岩动力成岩作用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005: 27-34.
Shou Jianfeng, Zhang Huiliang, Si Chunsong. Diagenetic dynamics of Sandstones Reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005: 27-34. (in Chinese)

[9] 曲爱英, 孟元林, 肖丽华, 颖秀兰, 杨俊生, 李臣, 罗宪雯. 储层质量钻前预测方法探讨-以松辽盆地汪家屯地区为例[J]. 石油实验地质, 2005, 27(1): 94-97.
Qu Aiyang, Meng Yuanlin, Xiaolihua, Ying Xiulan, Yang Junsheng, Li Chen, Luo Xianying. Study on predrilling reservoir quality prediction-Taking Wangjiatun Region, the Songliao Basin as an example[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2005, 27(1): 94-97. (in Chinese with English abstract)

[10] 孟元林, 刘德来, 贺如, 王志国, 张文才, 殷秀兰, 李军. 歧北凹陷超压背景下的成岩场分析与储层孔隙度预测[J]. 沉积学报, 2005, 23(3): 389-396.
Meng Yuanlin, Liu Delai, He Ru, Wang Zhiguo, Zhang Wencai, Yin Xiulan, Li Jun. Diagenetic field analysis and porosity prediction of the Shaer member (Es2) in overpressure setting in the Qibei depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(3): 389-396. (in Chinese with English abstract)

[11] 孟元林, 王又春, 姜文亚, 张景军, 刘德来, 牛嘉玉, 孙洪斌, 施尚明, 古团, 修洪文. 辽河拗陷双清地区古近系沙河街组四段孔隙度演化模拟[J]. 古地理学报, 2009, 11(2): 225-232.
Meng Yuanlin, Wang Youchun, Jiang Wenya, Zhang Jingjun, Liu Delai, Niu Jiayu, Sun Hongbin, Shi Shangming, Gu Tuan, Xiu Hongwen. Porosity evolution simulation of the Member 4 of Shahejie Formation of Paleogene in Shuangqing area, Liaohede Depression[J]. Journal of Palaeogeography, 2009, 11(2): 225-232. (in Chinese with English abstract)

[12] 顾伟欣, 周红. 基于逐步回归分析的孔隙度预测方法[J]. 石油地质与工程, 2008, 22(1): 37-39.
Gu Weixin, Zhou Hong. Approach to porosity prediction based on stepwise regression[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2008, 22(1): 37-39. (in Chinese with English abstract)

[13] 侯启军, 冯志强, 冯子辉. 松辽盆地陆相石油地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009, 277-328.
Hou Qijun, Feng Zhiqiang, Feng Zihui. Continental petroleum geology of Songliao Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009, 277-328. (in Chinese)

[14] Zhang Liuping, Bai Guoping, Luo Xiaorong, et al. Diagenetic history of tight sandstones and gas entrapment in the Yulin Gas Field in the central area of the Ordos Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26: 974-989.

[15] Rick C T, Tony M C, Robert B L, Aysen O, et al. Reservoir quality modeling of tight-gas sands in Wamsutter field: Integration of diagenesis, petroleum systems, and production data[J]. AAPG Bulletin, 2010, 94(8): 1229-1266.

[16] 孟元林, 高煜婷, 吴勇勇, 王成, 修洪文, 张安达, 李亚光, 姜文亚. 松辽盆地北部中浅层区域成岩规律及影响因素[J]. 古地理学报, 2010, 12(1): 97-106.

- Meng Yuanlin, Gao Yuting, Wu Heyong, Wang Cheng, Xiu Hongwen, Zhang Anda, Li Yaguang, Jiang Wenya. Regional diagenetic regularity and controlling factors of middle-shallow horizons in the northern Songliao Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2010, 12(1): 97-106. (in Chinese with English abstract)
- [17] 孟元林, 王建伟, 吴河勇, 王成, 李亚光, 张安达, 修洪文, 姜文亚, 郭日鑫. 松辽盆地北部中浅层成岩作用与孔隙演化[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2010, 29(3): 217-226.
Meng Yuanlin, Wang Jianwei, Wu Heyong, Wang Cheng, Li Yaguang, Zhang Anda, Xiu Hongwen, Jiang Wenya, Guo Rixin. The diageneses and pore evolution of middle-shallow reservoirs in the Northern Songliao Basin[J]. *Bulletin of Mineral, Petrology and Geochemistry*, 2010, 29(3): 217-226. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张昌民, 胡明毅. 松辽盆地北部泉三、四段层序地层、沉积相研究[R], 中国石油大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 2008.
Zhang Changmin, Hu Mingyi. Study on the sequence stratigraphy and sedimentary facies of the third and Fourth Members of Quantou Formation in the Northern Songliao Basin[R]. Exploration and Development Research Institute, Daqing Oilfield Company Ltd., PetroChina, 2008. (in Chinese)
- [19] Anjos S M C, De Ros L F, De Souza R S, *et al.* Depositional and diagenetic control on the reservoir quality of Lower Cretaceous Penedencia sandstones, Potiguar rift basin, Brazil[J]. *AAPG Bulletin*, 2000, 84(11): 1719-1742.
- [20] Stacy A C, Ball N H, Hunt L E. Reservoir characterization and facies prediction within the Late Cretaceous Doe Creek Member, Valhalla field, west-central Alberta, Canada[J]. *AAPG Bulletin*, 2010, 94(1): 1-25.
- [21] 孟元林, 刘文慧, 孟凡晋, 梁伯勋, 王建伟, 潘雪梅, 田伟志, 王维安, 丁桂霞, 周振东, 肖丽华. 松辽盆地徐家围子断陷深层异常高孔带分布特征与成因分析[J]. *古地理学报*, 2011, 13(1): 75-84.
Meng Yuanlin, Liu Wenhui, Meng Fanjin, Liang Boxun, Wang Jianwei, Pan Xuemei, Tian Weizhi, Wang Wei'an, Ding Guixia, Zhou Zhendong, Xiao Lihua. Distribution and origin of anomalously high porosity zones of the Xujiaweizi Fault Depression in Songliao Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2011, 13(1): 75-84. (in Chinese with English abstract)
- [22] 赵澄林, 胡爱梅, 陈碧瑛. 油气储层评价方法[M]. 中华人民共和国石油与天然气行业标准, SY/T 6285-1997. 北京: 石油工业出版社, 1997, 8-9.
Zhao Chenglin, Hu Aimei, Chen Biyu. Evaluating methods of oil and gas reservoirs [M]. People's Republic of oil and gas industry standards, SY/T 6285-1997. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997, 8-9. (in Chinese)
- [23] 肖丽华, 孟元林, 王建国, 王子文, 周书欣. 碎屑岩成岩温度的数值模拟和成岩阶段的预测[J]. *中国海上油气(地质)*, 1995, 9(6): 389-394.
Xiao Lihua, Meng Yuanlin, Wang Jianguo, Wang Ziwen, Zhou Shuxin. Modelling of diagenetic temperature and lateral prediction of diagenetic stages for clastic rocks[J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 1995, 9(6): 389-394. (in Chinese with English abstract)
- [24] 孟元林, 黄文彪, 王粤川, 孙洪斌, 殷秀兰, 肖丽华, 高建烟, 胡宝林. 超压背景下粘土矿物转化的化学动力学模型及应用[J]. *沉积学报*, 2006, 24(4): 461-467.
Meng Yuanlin, Huang Wenbiao, Wang Yuechuan, Sun Hongbin, Yin Xiulan, Xiao Lihua, Gao Jianjun, Hu Badin. A Kinetic model of clay mineral transformation in overpressure setting and its applications[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(4): 461-467. (in Chinese with English abstract)
- [25] Mackenzie A S, McKenzie D. Isomerization and aromatization of hydrocarbon in sedimentary basin formed by extension[J]. *Geological Magazine*, 1983, 120(5): 417-470.
- [26] Sweeny J J and Burham A K. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics[J]. *AAPG Bulletin*, 1990, 74: 1559-1570.
- [27] Walderhaug O. Modeling quartz cementation and porosity in Middle Jurassic Brent Group sandstones of the Kvitebjørn Field Northern North Sea[J]. *AAPG Bulletin*, 2000, 84: 1325-1339.
- [28] 孟元林, 李娜, 黄文彪, 肖丽华, 刘德, 张清久, 孙洪斌, 修洪文. 辽河坳陷西部斜坡带南段沙三段成岩相分析与优质储层预测[J]. *古地理学报*, 2008, 10(1): 33-41.
Meng Yuanlin, Li Na, Huang Wenbiao, Xiao Lihua, Liu Delai, Zhang Qingjiu, Sun Hongbin, Xiu Hongwen. Diagenetic facies analysis and high quality reservoir prediction of the Cenozoic in southern segment of western slope of Liaohe Depression[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2008, 10(1): 33-41. (in Chinese with English abstract)
- [29] Meng Yuanlin, Yang Junsheng, Xiao Lihua. Diagenetic evolution modeling system and its application[J]. *Hao Dongheng. ed. Treatises of X III Kerulien international conference of geology. Shijiazhuang, P. R. China: Shijiazhuang University of Economics*, 2001, 25-27. (in Chinese with English abstract)
- [30] Zhou Y S, Littke R. Numerical simulation of the thermal maturation, oil generation and migration in the Songliao Basin, Northeastern China[J]. *Marine and petroleum geology*, 1999, 16(8): 771-792.
- [31] 刘吉余, 马志欣, 孙淑艳. 致密含气砂岩研究现状及发展展望[J]. *天然气地球科学*, 2008, 19(3): 316-320.
Liu Jiuyu, Ma Zhixin, Sun Shuyan. Present Research Situation and Prospects of Tight Gas Sands[J]. *Nature Gas Geoscience*, 2008, 19(3): 316-320. (in Chinese with English abstract)