

文章编号: 1000-0550(2006) 02-0185-08

渤海湾盆地西部凹陷南段成岩相分析与优质储层预测

孟元林¹ 高建军¹ 刘德来² 牛嘉玉³
孙洪斌⁴ 周 翥¹ 鞠俊成^{3,4} 王粤川¹

(1 大庆石油学院 河北秦皇岛 066004 2 中国石油天然气股份有限公司 北京 100112
3. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083 4. 中国石油辽河油田分公司 辽宁盘锦 124010)

摘要 储层实测孔隙度、普通薄片、铸体薄片和扫描电镜的资料表明,渤海湾盆地辽河拗陷西部凹陷南段新生界储层在纵向上发育三个次生孔隙带。从而在一个普遍低孔渗背景下,形成了孔隙度相对较高的优质储层。优质储层的形成和分布主要受沉积微相和成岩作用的影响与控制。他们形成于河口坝、辫状分流河道以及心滩沉积微相,目前处于早成岩阶段 B 期—中成岩阶段 A₁ 亚期,发育溶蚀成岩相。该文通过模拟古地温、镜质组反射率、甾烷异构化率和自生石英含量随时间的变化规律,预测了西部凹陷南段成岩阶段和成岩相的横向展布。通过成岩相图和沉积相图的叠合,预测了沙三中亚段优质储层的分布。预测结果表明,优质储层主要发育于斜坡区的中部。

关键词 优质储层 次生孔隙发育带 成岩作用 成岩相 成岩模拟 沉积微相 西部凹陷 渤海湾盆地

第一作者简介 孟元林 男 1961 年出生 博士 教授 储层与石油地质

中图分类号 TE122.2 **文献标识码** A

随着隐蔽油气藏和深层油气勘探的逐步深入,储层地质学面临四个领域的挑战:深层储层(埋深 > 3 500 m)、低孔渗储层、挤压盆地储层和碳酸盐岩储层^[1]。而深层储层的研究任务也是在深部高温、高压和低孔渗背景下寻找优质储层,所以在普遍低孔低渗背景下寻找优质储层,就成为目前储层地质学研究中的一个难点和热点^[1-9]。所谓优质储层是一个相对概念,并无严格的孔隙度和渗透率绝对指标,如果在一个普遍低孔渗背景下,发育有相对高的孔隙度及渗透率储层,就可以称之为优质储层^[2]。在深层高温、高压和低孔渗条件下存在优质储层已是大家公认的事实,但优质储层的成因、保存机理和预测仍是困扰油气勘探的突出难题^[1,3,4,8]。渤海湾盆地辽河拗陷西部凹陷南段沙河街组三段的埋深大于 3 500 m,烃源岩发育,油源充足,深层勘探已发现了工业油气流,但由于埋深较大,储层物性较差,所以在普遍低孔渗背景下寻找孔隙度相对较高的优质储层,就成为该地区深层勘探以及岩性油气藏勘探中亟待解决的问题。本文试图在研究渤海湾盆地辽河拗陷西部凹陷南段新生界碎屑岩优质储层形成的沉积环境和成岩特征的基础上,应用成岩作用数值模拟技术,在深层进行成岩相分析与优质储层预测,为该地区以及中国东部其他盆地深层的油气

勘探提供科学的依据。

1 地质概况

渤海湾盆地辽河拗陷西部凹陷南段的面积约 180 km²。新生界从下到上依次发育古近系的房身泡组、沙河街组、东营组,新近系的馆陶组、明化镇组和第四系。其中沙河街组三段生、储岩系发育,是本区深层的主要勘探目标,又可进一步分为三个亚段。沙三中亚段沉积时期,北东向的断裂强烈活动,造成物源区和沉积区的显著高差,来自研究区西侧的陆源碎屑物由辫状河或以阵发性沉积物重力流沿西部凹陷的短轴方向注入湖盆,形成了扇三角洲沉积体系,从 NW 至 SE 依次发育扇三角洲平原、前缘以及前扇三角洲亚相,又可进一步分为河口坝、辫状分流河道、心滩和沼泽微相沉积(图 1)。

2 储层岩石学特征与成岩作用研究

802 块的薄片镜下鉴定资料以及 X-衍射全岩分析表明,沙三段储层以长石砂岩、长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩为主,长石含量在 31.4% ~ 39.5% 之间,岩屑含量介于 21.3% ~ 42.4%。岩屑成份主要为火成岩屑、中性喷出岩屑。填隙物主要为碳酸盐岩和泥质,含量在 1.2% ~ 48.1% 之间。

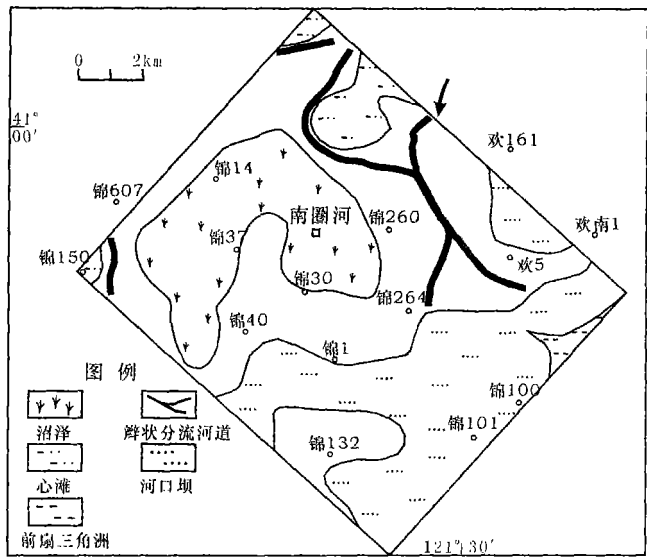


图 1 西部凹陷南段沙三中亚段沉积相图
(据牛嘉玉修改, 2004)

Fig 1 Sedimentary facies map of the third middle member of the Shahejie Formation in the Southern Xibu Depression
(modified from Niujiayu 2004)

依据普通薄片、扫描电镜、铸体薄片、流体包裹体均一温度、镜质组反射率、孢粉颜色、X衍射和有机的测试结果(表 1), 参照最新的中国石油与天然气

行业碎屑岩成岩阶段划分规范^[10], 将西部凹陷南段新生界碎屑岩的成岩作用划分为早成岩和中成岩两个阶段, 共四个(亚)期。早成岩阶段 A 期、B 期和中成岩阶段 A₁和 A₂亚期的底界深度分别为 1600 ± 200 m、2900 ± 200 m、3800 ± 200 m 和 4500 ± 200 m (表 1)。

在早成岩阶段 A 期, 成岩作用以机械压实和早期碳酸盐胶结为主, 主要发育早期机械压实和胶结相(表 1)。在早成岩阶段 B 期和中成岩阶段 A₁亚期, 干酪根在热降解生烃的同时, 生成大量有机酸和 CO₂, 溶蚀储层中的铝硅酸盐矿物和碳酸盐胶结物等易溶矿物组分, 产生次生孔隙^[3-5, 7-29], 主要发育溶蚀成岩相。在中成岩阶段 A₂亚期, 有机质大量生烃, 但烃源岩产酸量减少, 局部又有胶结作用产生, 主要发育溶蚀及部分再胶结相。在中成岩阶段 B 期以后, 烃源岩进入高成熟阶段, 有机酸被裂解为 CO₂和水, 溶蚀作用非常弱, 主要发育紧密压实成岩相。

3 次生孔隙发育带的纵向分布特征

次生孔隙是西部凹陷新生界碎屑岩深部储层的主要储集空间。然而, 有关次生孔隙发育带的分布和成因, 争议较大。不同研究者所得出的次生孔隙发育

表 1 西部凹陷南段新生界成岩特征

Table 1 Major diagenetic characters of the Cenozoic reservoirs in the southern Xibu Depression

成岩阶段	阶段	成岩相	有机质			泥质岩		砂岩中自生矿物										溶解作用	接触类型	孔隙类型	I ₀	深度 (m)
			R.%	孢粉颜色 TAI	成熟带	有机酸	I/S 中层 %	混层类型分布	蒙皂石	伊蒙混层	高岭石	伊利石	绿泥石	石英加大	方解石	铁白云石	长石加大					
早成岩	A	早期压实胶结相	0.35	淡黄	未成熟		80	蒙皂石											原生孔	0.18	1600 ± 200	
	B	溶蚀相	0.5	黄	半成熟		45	无序层带											混合孔	0.28	2900 ± 200	
中成岩	A ₁	溶蚀相	0.8	桔黄	低熟		35	部分有序层										点—线	次生孔	0.45	3800 ± 200	
	A ₂	溶蚀及部分再胶结相	1.3	棕	成熟		20	完全有序层										点—线	次生孔	0.68	4500 ± 200	
	B	紧密压实相	>1.3	棕黑	高成熟			超点阵有序层										线—缝合	次生孔—裂缝	1.00	>4500	

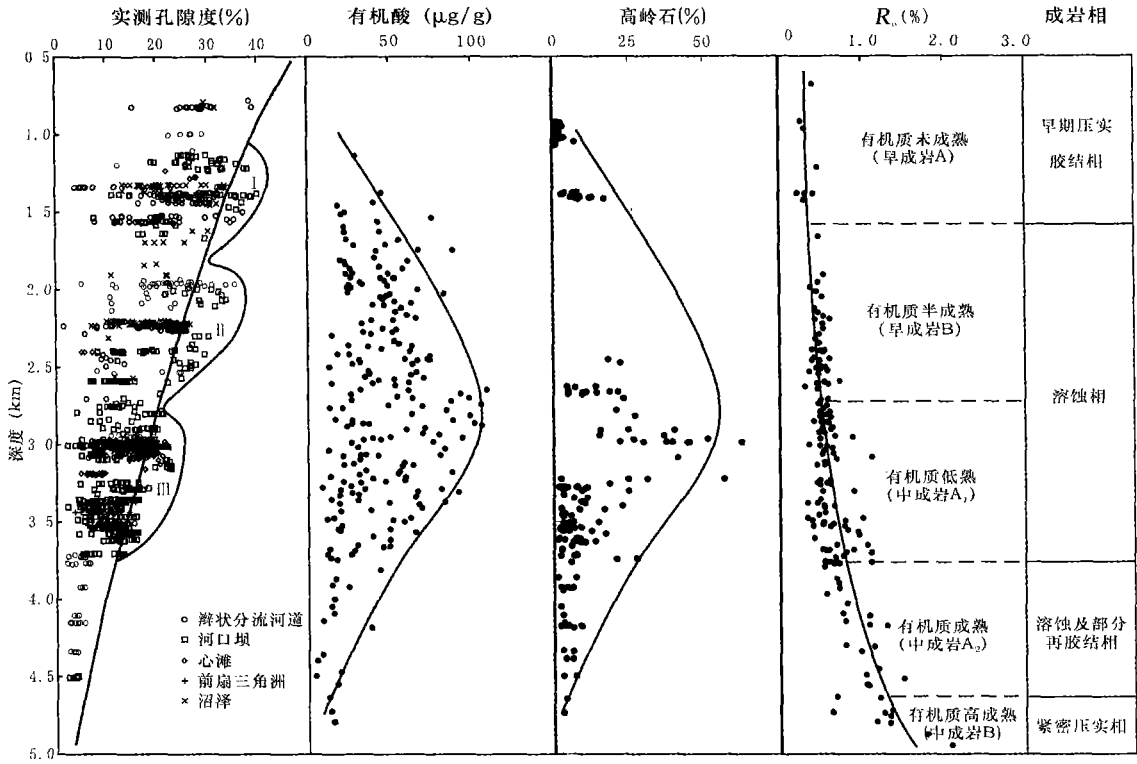


图 2 西部凹陷南段储层次生孔隙带分布及其成因

Fig 2 Secondary porosity zones in the reservoirs and their geneses in the southern Xibu Depression

带的分布和成因相差很大,少则两、三个,多达五、六个^[28-29]。岩心的实测孔隙度、普通薄片、扫描电镜和铸体薄片资料表明,西部凹陷南段新生界储层在 1 050~1 700 m、1 950~2 700 m 和 2 800~3 800 m 之间发育 3 个次生孔隙带(图 2)。凹陷区 3 个次生孔隙带均有发育,斜坡区只发育第一、二次生孔隙带。正是由于这三个次生孔隙发育带的出现,使得新生界深部碎屑岩储层在一个普遍低孔渗背景下,发育了孔隙度相对较高的优质储层。

4 优质储层成因分析

研究表明,本区油气储层物性主要受沉积微相和

成岩相的影响与控制(表 2)。在同一成岩相,储层物性从河口坝、辫状分流河道、心滩和沼泽依次变差;对于同一沉积微相,处于早成岩阶段 B 期溶蚀相的储层物性最好,紧密压实成岩相的物性最差,其他成岩相的储层介于二者之间。储层孔隙度并不总是随着成岩强度的增加而降低,例如:处于早成岩阶段 B 期分流河道储层的孔隙度就高于早成岩阶段 A 期,这是由于前者的溶蚀作用更强。然而,同属于溶蚀成岩相的储层,无论是河口坝还是分流河道,处于早成岩阶段 B 期砂体的孔隙度均高于中成岩阶段 A₁ 亚期,其原因是二者的溶蚀作用均很强,但后者的压实作用更强。

表 2 西部凹陷南段储层孔隙度统计表

Table 2 Statistics of the reservoir porosity in the southern Xibu Depression

成岩阶段	成岩相	河口坝	分流河道	心滩	沼泽
早成岩阶段 A	早期压实胶结相	-	21 86(127)	-	22 15(41)
早成岩阶段 B	溶蚀成岩相	30 44(7)	23 38(36)	18 93(8)	-
中成岩阶段 A ₁	溶蚀成岩相	15 47(40)	15 19(44)	-	14 36(33)
中成岩阶段 A ₂	溶蚀及部分再胶结相	10 85(39)	10 67(12)	-	-
中成岩阶段 B	紧密压实成岩相	2 90(4)	-	-	-

注:平均值(样品数)

4 1 沉积相和岩性

统计表明,西部凹陷南段新生界碎屑岩三个次生孔隙发育带内的优质储层,主要形成于河口坝、辫状分流河道以及心滩沉积微相(图 2),均属于高能环境下形成的砂体。尽管每个次生孔隙发育带的优质储层形成的沉积微相不同,但这些砂体却有着共同的岩石学特征——均为结构成熟度和成分成熟度较高的砂岩,矿物成份中长石含量平均 > 30.0%,几乎全部为长石砂岩,而且以细砂岩为主,次为中砂岩和粉砂岩。碎屑颗粒分选良好,分选系数的平均值 < 1.76。

4 2 成岩相

西部凹陷南段优质储层的形成与溶蚀作用形成的次生孔隙密切相关。溶蚀作用分为大气降水对储层的淋滤和泥岩生成有机酸对储层的溶蚀。西部凹陷南段第一次生孔隙带主要分布在古近系新近系沙一段沙二段之间不整合面附近 200.00m 的范围内,其形成与大气水的淋滤有关。此外,目前第一次生孔隙发育带的下部已进入早成岩阶段 B 期,有机质处于半成熟阶段,泥岩中的干酪根可以脱羧,生成有机酸和 CO₂,溶蚀储层中的铝硅酸盐矿物长石和碳酸盐胶结物,形成次生孔隙。因此,第一次生孔隙带的成因除与大气水淋滤有关外,还与有机酸的溶蚀有关系。虽然西部凹陷南段第一、二次生孔隙带在纵向上分布的深度不同,但它们均对应于有机酸高峰带(图 2),有机酸含量 > 50μg/g 泥岩,成岩流体介质呈酸性,相当于早成岩阶段 B 期—中成岩阶段 A₁ 亚期,处于溶蚀成岩相,储层中的长石和碳酸盐岩等酸性不稳定矿物遭到强烈溶蚀,形成优质储层。长石溶解后,一部分溶解物质以离子或络合物的形式进入孔隙流体,在流体运移的过程中被带走;另一部分则沉淀下来,形成高岭石。在扫描电镜中常常见到被溶蚀的长石表面和次生孔隙中发育自生高岭石。而且 X-衍射的资料也进一步表明,粘土矿物中高岭石的相对含量与次生孔隙呈正相关关系(图 2)。

5 成岩作用数值模拟与成岩相预测

5 1 基本原理

综合考虑温度、压力、时间、流体性质对碎屑岩成岩作用的影响,选取对成岩作用反应敏感的、成岩阶段划分常用的成岩指标古地温 T 、镜质组反射率 R_o 、甾烷异构化指数 $SI(C_{29}S/R+S)$ 、伊/蒙混层中蒙皂石层的含量 $S\%$ 和自生石英含量 $V_q\%$ 这 5 项参数,分别在时空领域内进行单项成岩作用的数值模

拟^[30-38],然后将这些指标加以组合,构造了一个能够综合反映成岩作用强度、且便于成岩阶段划分的函数—成岩指数 I_D 。在盆地的范围内,由计算机自动划分成岩阶段,进行大尺度的成岩作用模拟:

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

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 期末的最大值; P_i 为第 i 个成岩指标的权值,其和为 1.00。

参考最新的中国石油与天然气行业碎屑岩成岩阶段划分规范^[10],本文确定了西部凹陷南段各成岩阶段所对应的 I_D (表 1)。这样,就实现了碎屑岩成岩阶段划分的数值化。将早成岩阶段—中成岩阶段 B 期数值化为 0.00~1.00,当 $I_D=0.00$ 时,成岩作用刚刚开始; $I_D=1.00$ 对应于中成岩阶段 B 期的结束;当 $I_D>1.00$ 时,进入晚成岩阶段。

所谓成岩相是指成岩环境与成岩产物的综合,目前人们主要根据成岩环境和成岩作用类型划分成岩相^[27],不同的成岩阶段具有不同的成岩环境和主要成岩作用类型,对应着不同的成岩相(表 1)。所以通过成岩作用数值模拟和成岩阶段横向预测,就可预测成岩相的平面展布。

5 2 沙三中亚段成岩阶段和成岩相预测

首先以三维地震数据体和钻井资料为基础,建立了西部凹陷南段成岩作用数值模拟网络,网络中各模拟点的间距为 0.5 km;然后通过模拟网络中各点不同地质时期古地温 T 、镜质组反射率 R_o 、甾烷异构化指数 $C_{29}S/R+S$ 、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^[30-38],计算成岩指数 I_D ,得到研究目的层不同地质时期的成岩指数 I_D 等值线。

图 3 是现今西部凹陷南段沙三中亚段底成岩指数 I_D 等值线和成岩相预测图。由图可见,沙三中亚段所处的成岩阶段主要受埋深的影响与控制,成岩强度从 NW 到 SE 依次增加。由早成岩阶段 A 期、B 期经中成岩阶段 A₁、A₂ 亚期过渡到中成岩阶段 B 期。在本区的西北部, $I_D < 0.18$ 处于早成岩阶段 A 期,主要发育早期机械压实和胶结相(图 3),储层储集空间以原生孔隙为主。在中部地区, $0.18 < I_D < 0.45$ 沙三中亚段处于早成岩阶段 B—中成岩阶段 A₁ 亚期,有机质处于半成熟—低成熟阶段,烃源岩进入有机酸生

成主带,成岩流体介质呈酸性,储层主要发育溶蚀成岩相(图 3);而在东部锦 127—欢南 4 井一线以东、锦 130—锦 100 一线以西之间的地区,沙三中亚段 $0.45 < I_D < 0.68$ 处于中成岩阶段 A_2 亚期,有机质进入大量生烃的成熟阶段,以产轻质油为主,烃源岩的有机酸生成量减少,储层主要发育溶蚀及部分再胶结相(图 3)。在锦 130—锦 100 以东的深凹陷区, $I_D > 0.68$,沙三中亚段进入中成岩阶段 B 期,烃源岩进入高成熟阶段,有机酸被裂解为 CO_2 和水,溶蚀作用非常弱,储层主要发育紧密压实成岩相。

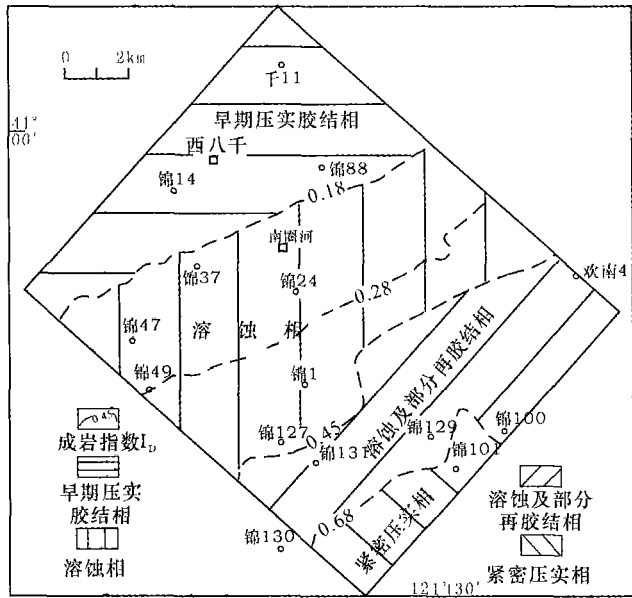


图 3 西部凹陷南段沙三中亚段 I_D 等值线与成岩相分布
Fig 3 I_D contour map and the predicted diagenetic facies of the third middle member of Shahejie Formation in the Southern Xibu Depression

6 沙三中亚段优质储层预测

研究表明,碎屑岩储层的质量,亦即物性,主要受沉积相、成岩作用以及构造的影响与控制 [2-9, 17, 18, 23, 37, 39-41],但构造对储层物性的影响相对局限,而且复杂,本文未予考虑。西部凹陷南段沙三中亚段的埋深较大,储层次生孔隙发育带的形成与大气水的淋滤作用关系不大,主要受沉积微相和有机酸溶蚀作用的影响与控制。因此,通过叠合成岩相图与沉积相图即可预测其优质储层的平面展布(图 4)。图中处于早成岩阶段 B 期—中成岩阶段 A_1 亚期的溶蚀成岩相区 ($I_D = 0.18 \sim 0.45$),且沉积微相为河口坝、辫状分流河道以及心滩的区域即为西部凹陷南段

沙三中亚段优质储层发育区。这一区域主要分布在西部凹陷南段中部的斜坡带,其延伸方向大致平行于西部斜坡的走向。储层实测孔隙度和测井孔隙度的资料也证实了这一预测结果(图 4),目前已发现沙三中亚段存在次生孔隙发育带、储层孔隙度相对较高的钻井,如锦 4Q 锦 135 锦 127 锦 265 和锦 260 井等,绝大部分出现在我们预测的范围内(图 4);在该地区以西,埋深较大,目前主要处于中成岩阶段 A_1 亚期的溶蚀及部分再胶结成岩相区 ($I_D = 0.45 \sim 0.68$),溶蚀作用较弱,储层物性相对较差,而西部凹陷南段沙三段处于中成岩阶段 B 期 ($I_D > 0.68$) 的储层,已进入西部凹陷的深凹区,主要发育紧密压实成岩相,物性很差,目前尚未发现工业油气流。

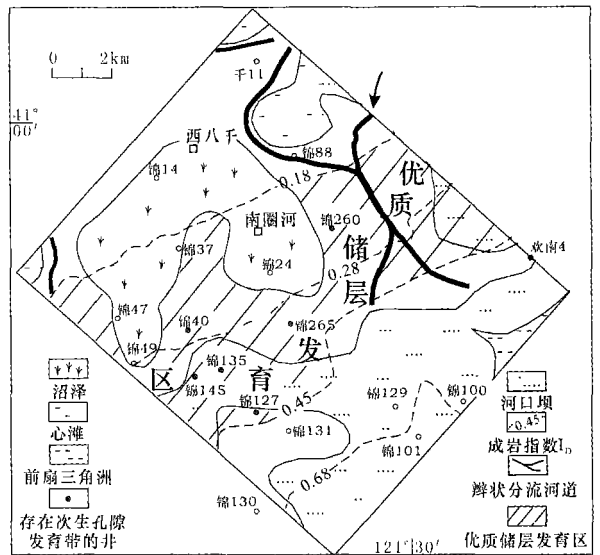


图 4 西部凹陷南段沙三中亚段优质储层预测
Fig 4 Map showing the predicted high-quality reservoirs of the third middle member of Shahejie Formation in the southern Xibu Depression

7 结论

(1) 渤海湾盆地西部凹陷南段新生界储层在纵向上发育三个次生孔隙带,在普遍低孔渗背景下,形成了孔隙度相对较高的优质储层。优质储层主要发育于河口坝、辫状分流河道以及心滩沉积微相,目前处于早成岩阶段 B 期—中成岩阶段 A_1 亚期的溶蚀相。

(2) 不同的成岩阶段对应不同的成岩相,应用成岩作用数值模拟技术可以在横向上预测成岩阶段和成岩相的展布。

(3) 通过叠合沉积相图和成岩相图,即可预测优质储层的分布。沙三中亚段优质储层主要发育于鸳鸯沟斜坡区的中部。

参考文献 (References)

- 1 罗平, 裴悻楠, 贾爱林, 等. 中国油气储层地质研究面临的挑战和发展方向. 沉积学报, 2003, 21(1): 142~147 [Luo Ping, Qiu Yinan, Jia Ailin, *et al* The present challenges of Chinese petroleum reservoir geology and research direction. *Acta Sedimentologica Sinica* 2003, 21(1): 142~147]
- 2 王多云, 郑希民, 李凤杰, 等. 低孔渗油气富集区优质储层形成条件及相关问题. 天然气地球科学, 2003, 14(2): 87~91 [Wang Duoyun, Zheng Xinmin, Li Fengjie, *et al* Forming condition of high-quality reservoir and its relative problems in low porosity and permeability enrichment zone. *Natural Gas Geosciences* 2003, 14(2): 87~91]
- 3 Bloch S, Lander R H and Bormell L. Anomously high porosity and permeability in deeply buried sandstone reservoirs. Origin and predictability. *AAPG Bulletin* 2002, 86(2): 301~328
- 4 Kupecz JA, Gulyas J and Bloch S. Reservoir quality prediction in sandstones and carbonates. An overview. *AAPG Memoir* 1997, 69 ~
- 5 史基安, 陈国俊, 王琪, 薛莲花. 塔里木盆地西部层序地层与沉积、成岩演化. 北京: 科学出版社, 2001, 186~219 [Shi Ji'an, Chen-Guojun, Wang Qi, Xue Lianhua. Sequence Stratigraphy, Sedimentary and Diagenetic Evolution in the Western Tarim Basin. Beijing: Science Press, 2001, 168~219]
- 6 王多云, 李凤杰, 王峰, 等. 储层预测和油藏描述中的一些沉积学问题. 沉积学报, 2004, 22(2): 193~197 [Wang Duoyun, Li Fengjie, Wang Feng, *et al* Some sedimentological problems on reservoir prediction and oil pool characterization. *Acta Sedimentologica Sinica* 2004, 22(2): 193~197]
- 7 于兴河, 郑凌茂, 宋立衡, 等. 构造、沉积与成岩综合一体化模式的建立. 沉积学报, 1997, 15(3): 8~13 [Yu Xinghe, Zheng Luming, Song Liheng, *et al* The establishment of integrated model on structure deposition and diagenesis. *Acta Sedimentologica Sinica* 1997, 15(3): 8~13]
- 8 赵澄林. 沉积学原理. 北京: 石油工业出版社, 2003, 15~21 [Zhao Chenlin. Principle of Sedimentology. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003, 15~21]
- 9 肖丽华, 孟元林, 侯创业, 等. 松辽盆地升平地区深层成岩作用数值模拟与次生孔隙带预测. 地质论评, 2003, 49(5): 544~551 [Xiao Lihua, Meng Yuanlin, Hou Chuangye, *et al* Diagenesis modeling and secondary pore zone predicting of the deep formation in the Shengping area of the Songliao Basin. *Geological Review*, 2003, 49(5): 544~551]
- 10 应凤祥. SY/T5477-2003 中华人民共和国石油天然气行业标准并碎屑岩成岩阶段划分. 北京: 石油工业出版社, 2003 [Ying Fengxiang. SY/T5477-2003. The Division of Diagenetic Stages in Clastic Rocks (Petroleum Industry Criterion in P. R. C.). Beijing: Petroleum Industry Press, 2003]
- 11 Surlan R C. Organic-inorganic interactions and sandstone diagenesis. *AAPG Bulletin* 1989, 73(1): 1~23
- 12 Barth T and Bjørlykke K. Organic acids from rock maturation: generation potentials, transport mechanisms and relevance for mineral diagenesis. *Applied Geochemistry* 1993, 8: 325~337
- 13 Bloch S. Secondary porosity in sandstones: significance, origin, relationship to subaerial unconformities and effect on predrilling reservoir quality prediction. In: Wilson M D, ed. Reservoir quality assessment and prediction in clastic rocks. *SEPM Short Course* 1994, 30: 137~159
- 14 Bloch S and Stephen G F. Preservation of shallow plagioclase dissolution porosity during burial: Implications for porosity prediction and aluminum mass balance. *AAPG Bulletin* 1993, 77(9): 1488~1501
- 15 Wilson M D and Stanton P T. Diagenetic mechanisms of porosity and permeability reduction and enhancement. In: Wilson M D, ed. Reservoir quality assessment and prediction in clastic rocks. *SEPM Short Course* 1994, 30: 59~118
- 16 向廷生, 蔡春芳, 付华娥. 不同温度、羧酸溶液中长石溶解模拟实验. 沉积学报, 2004, 22(4): 597~602 [Xiang Tingsheng, Cai Chunfang, Fu Hua'e. Dissolution of microcline by carboxylic acids at different temperatures and complexing reaction of Al³⁺ ion with carboxylic acid in aqueous solution. *Acta Sedimentologica Sinica* 2004, 22(4): 597~602]
- 17 罗静兰, 张晓莉, 张翔翔, 等. 成岩作用对河流—三角洲相砂岩储层物性演化的影响. 沉积学报, 2001, 19(4): 542~547 [Luo Jinglan, Zhang Xiaoli, Zhang Xiangxiang, *et al* The diagenetic impact on reservoir quality evolution of fluvial deltaic sandstones. *Acta Sedimentologica Sinica* 2001, 19(4): 542~547]
- 18 李捷, 王海云. 东北晚中生代断陷盆地储层次生孔隙形成机制. 沉积学报, 1999, 17(4): 591~595 [Li Jie, Wang Haiyun. The development mechanism of the secondary pores in the reservoirs of the down-faulted basins of the Late Mesozoic Era in the Northeast of China. *Acta Sedimentologica Sinica* 1999, 17(4): 591~595]
- 19 刘林玉, 陈刚, 柳益群, 等. 碎屑岩储集层溶蚀型次生孔隙发育的影响因素分析. 沉积学报, 1998, 16(2): 97~101 [Liu Linyu, Chen Gang, Liu Yiqun, *et al* Analysis on influencing factors of Solution-type secondary pore evolution in clastic reservoirs. *Acta Sedimentologica Sinica* 1998, 16(2): 97~101]
- 20 王宝清, 张荻楠, 刘淑萍, 等. 龙虎泡地区高台子油层成岩作用及其对储集岩孔隙演化的影响. 沉积学报, 2000, 18(3): 414~423 [Wang Baqing, Zhang Dinan, Liu Shuping, *et al* Diagenesis of reservoir rocks of Gaotaizi Oil Bed (Cretaceous) and its influence on porosity modification in Longhupao Field Area. *Acta Sedimentologica Sinica* 2000, 18(3): 414~423]
- 21 史基安, 王金鹏, 毛明陆, 等. 鄂尔多斯盆地西峰油田三叠系延长组长6—8段储层砂岩成岩作用研究. 沉积学报, 2003, 21(3): 373~380 [Shi Ji'an, Wang Jinpeng, Mao Minglu, *et al* Reservoir sandstone diagenesis of Member 6 to 8 in Yanchang Formation (Triassic), Xifeng Oilfield, Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica* 2003, 21(3): 373~380]
- 22 傅强. 成岩作用对储层孔隙的影响. 沉积学报, 1998, 16(3): 92~

- 96 [Fu Qiang Diagenesis effect on reservoir pores Acta Sedimentologica Sinica 1998 16(3): 92~96]
- 23 史基安, 王琪. 影响碎屑岩天然气储层物性的主要控制因素. 沉积学报, 1995 13(2): 128~139 [Shi Ji'an Wang Qi A discussion on main controlling factors on the properties of clastic gas reservoirs Acta Sedimentologica Sinica 1995, 13(2): 128~139]
- 24 薛莲花, 史基安, 晋慧娟. 辽河盆地沙河街组砂岩中碳酸盐胶结作用对孔隙演化控制机理研究. 沉积学报, 1996 14(2): 102~109 [Xue Lianhua Shi Ji'an Jin Huijuan. Study of controlling mechanism of carbonate cementation on porosity evolution in Lower Tertiary sandstones of the Liaohe Basin Acta Sedimentologica Sinica 1996 14(2): 102~109]
- 25 王琪, 史基安, 薛莲花, 等. 碎屑储集岩成岩演化过程中流体-岩石相互作用特征. 沉积学报, 1999 17(4): 584~590 [Wang Qi, Shi Ji'an, Xue Lianhua et al. Characteristics of fluid-rock interaction in clastic reservoir controlled by evolution of diagenetic environment Acta Sedimentologica Sinica 1999, 17(4): 584~590]
- 26 史基安, 晋慧娟, 薛莲花. 长石砂岩中长石溶解作用发育机理及其影响因素分析. 沉积学报, 1994 12(3): 67~75 [Shi Ji'an Jin Huijuan, Xue Lianhua. Analysis on mechanism of feldspar dissolution and its influencing factors in feldspar-rich sandstone reservoir Acta Sedimentologica Sinica 1994 12(3): 67~75]
- 27 袁峰楠, 薛叔浩, 应凤祥. 中国陆相油气储集层. 北京: 石油工业出版社, 1997. 147~217 [Qiu Yinan, Xue Shuhao Ying Fengxiang. Continental Hydrocarbon Reservoir of China. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997. 147~217]
- 28 孙洪斌, 张凤莲. 辽河断陷西部凹陷古近系砂岩储层. 古地理学报, 2002 4(3): 83~92 [Sun Hongbin Zhang Fenglian. Sandstone reservoirs characteristics of the Paleocene Western Depression of Liaohe Rifts. Journal of Palaeogeography, 2002 4(3): 83~92]
- 29 李琳, 任作伟, 孙宏斌. 辽河盆地西部凹陷深层石油地质综合评价. 石油学报, 1999 20(6): 9~15 [Li Lin, Ren Zuowei Sun Hongbin. An integrated evaluation on petroleum geology of the deep reservoir in the West Sag Liaohe Basin, China. Acta Petrolei Sinica 1999, 20(6): 9~15]
- 30 Sweeney J J, Burnham A K. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics. AAPG Bulletin, 1990 74: 1559~1570
- 31 Walkerhaug O. Kinetic modeling of quartz cementation and porosity loss in deeply buried sandstone reservoirs. AAPG Bulletin, 1996 80: 731~745
- 32 Walkerhaug O. Modeling quartz cementation and porosity in Middle Jurassic Brent Group sandstones of the Kviteseid Field, Northern North Sea. AAPG Bulletin, 2000 84: 1325~1339
- 33 Mackenzie A S, Mackenzie D. Isomerization and aromatization of hydrocarbon in sedimentary basin formed by extension. Geology Magazine, 1983, 20: 417~470
- 34 Meng Yuanlin, Yang Junsheng, Xiao Lihua, et al. Diagenetic evolution modeling system and its application. In: Hao Dongheng, ed. Treatises of Kenulien International Conference of Geology. Shijiazhuang, P. R. China: Shijiazhuang University of Economics, 2001. 25~27
- 35 Meng Yuanlin, Xiao Lihua, Zhang Jing. Basin modeling by gravity magnetics and electrical information and its application. In: Liu B J, Li S T, eds. Basin Analysis: Global Sedimentary Geology and Sedimentology. Amsterdam: VSP, 1997. 197~207
- 36 孟元林, 肖丽华, 王建国, 等. 粘土矿物转化的化学动力学模型及其应用. 沉积学报, 1996 14(2): 110~116 [Meng Yuanlin, Xiao Lihua, Wang Jianguo, et al. Kinetic model of clay mineral transformation and its application. Acta Sedimentologica Sinica 1996 14(2): 110~116]
- 37 孟元林, 牛嘉玉, 肖丽华, 等. 歧北凹陷沙二段超压背景下的成岩场分析与储层孔隙度预测. 沉积学报, 2005 23(3): 389~396 [Meng Yuanlin, Ni Jiayu, Xiao Lihua, et al. Diagenetic field analysis and porosity prediction of the Sha'er Mamber (E₂) in overpressure setting in the Qibei Depression. Acta Sedimentologica Sinica 2005, 23(3): 389~396]
- 38 肖丽华, 孟元林, 牛嘉玉, 等. 歧口凹陷沙河街组成岩分析和成岩阶段预测. 地质科学, 2005 40(3): 346~362 [Xiao Lihua, Meng Yuanlin, Ni Jiayu, et al. Diagenetic history and diagenetic stages prediction of Shahejie Formation in the Qikou Sag. Scientia Geologica Sinica 2005 40(3): 346~362.]
- 39 黄思静, 侯中建. 地下孔隙率和渗透率在空间和时间上的变化及影响因素. 沉积学报, 2001 19(2): 224~232 [Huang Sijing, Hou Zhongjian. Spatio-temporal variation of subsurface porosity and permeability and its influential factors. Acta Sedimentologica Sinica 2001, 19(2): 224~232]
- 40 孟元林, 王粤川, 牛嘉玉, 等. 储层孔隙度预测与有效天然气储层确定. 天然气工业, 2007 27(7), 待刊 [Meng Yuanlin, Wang Yuechuan, Ni Jiayu, et al. Reservoir porosity prediction and effective gas reservoir determination. Natural Gas Industry, 2007 27(7), to be published.]
- 41 孟元林, 高建军, 牛嘉玉, 等. 扇三角洲体系沉积微相对成岩作用的控制作用. 石油勘探与开发, 2006 33(1), 待刊 [Meng Yuanlin, Gao Jianjun, Ni Jiayu, et al. The controls of the sedimentary microfacies of the fan-delta on the diagenesis. Petroleum Exploration and Development, 2006 33(1), to be published.]

Diagenetic Facies Analysis and High-Quality Reservoir Prediction in the Southern Xibu Depression of the Bohaiwan Basin

MENG Yuan-lin¹ GAO Jian-jun¹ LU De-lai² NU Jia-yu³
SUN Hong-bin⁴ ZHOU Yue¹ JU Jun-cheng^{3,4} WANG Yue-chuan¹

(1 Daqing Petroleum Institute, Qingshuangdao, Hebei 066004; 2 PetroChina Company Limited, Beijing 100112;

3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083)

4 Liahe Oilfield Branch Company, PetroChina, Panjin, Liaoning 124010)

Abstract There exist three secondary porosity zones vertically in the Cenozoic reservoirs of the Southern Xibu Depression of the Bohaiwan Basin as revealed by the measured porosity data, thin sections, blue epoxy resin-impregnated thin sections and scanning electron microscopes. As a result, the high-quality reservoirs are developed. Sedimentary microfacies and diageneses control the formations and occurrences of the high-quality reservoirs, which are dominantly formed in the channel mouth bar, braided channel and channel bar deposits located in the early diagenetic stage B~middle diagenetic stage A₁ and dissolution diagenetic facies. The diagenetic stages and diagenetic facies are predicted by modeling the paleotemperature, vitrinite reflectance, sterane isomerization rate and authigenic quartz concentration in space and time. The high-quality reservoirs of the third middle member of Shahejie Formation are delineated by superposing the diagenetic facies map on the microfacies map. They are mainly in the middle part of the slope of the Southern Xibu Depression.

Key words high-quality reservoir, secondary porosity zone, diagenesis, diagenetic facies, diagenetic modeling, sedimentary microfacies, Xibu Depression, Bohaiwan Basin