

文章编号: 0253-9985(2007)03-0377-07

柴达木盆地石泉滩地区下侏罗统 小煤沟组砂岩储层演化特征

姚根顺^{1,2}, 寿建峰², 王少依², 陈子料²

(1. 青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国石油 勘探开发研究院 杭州地质研究所, 浙江 杭州 310023)

摘要: 近几年柴达木盆地石泉滩地区下侏罗统小煤沟组厚层砂岩储层中油气的发现使人们对其储层特征和成因机理引起重视。通过该区 7 口井的储层岩石学研究, 认为小煤沟组砂岩储层主要为大气水淋滤溶蚀形成的次生孔隙储层, 溶蚀作用的程度决定了储集性质的优劣。储层经历了早侏罗世的弱压实阶段、中侏罗世至白垩纪的大气水淋溶阶段、古近纪的强压实阶段和新近纪的抬升保持阶段。弱压实阶段的成岩压实量约 5.5% ~ 6.5%; 大气水淋溶阶段形成发育的溶蚀孔隙, 其增孔量在 4.6% ~ 16.5%, 同时伴随蒙脱石矿物的形成; 强压实阶段使砂岩的成岩压实量达到 19.0% ~ 21.5%, 此外有少量方解石析出, 该阶段是砂岩原生孔隙的主要消失时期; 新近纪储层发生抬升, 储层特征基本保持不变。中侏罗世至白垩纪的大气水淋滤溶蚀和古近纪的强烈压实是该区储层成岩演化的两个重要阶段, 它决定了储层的成因类型及储集性质。

关键词: 砂岩储层; 成因类型; 演化机理; 下侏罗统; 柴达木盆地

中图分类号: TE122.2 **文献标识码:** A

Evolution of sandstone reservoirs in the Lower Jurassic Xiaomeigou Formation, Shiquantan area, Qaidam basin

Yao Genshun^{1,2}, Shou Jianfeng², Wang Shaoyi², Chen Ziliao²

(1. Qingdao Marine Geology Research Institute, Qingdao, Shandong 266071;

2. Hangzhou Geological Research Institute, PetroChina, Hangzhou, Zhejiang 310023)

Abstract Recent oil and gas discoveries in the thick sandstone reservoirs in the Lower Jurassic Xiaomeigou Formation in Shiquantan area, Qaidam basin, attract attentions to their reservoir characteristics and genetic mechanisms. Detailed petrological study of the reservoirs of 7 wells in the area reveals that the sandstone reservoirs in the Xiaomeigou Formation are dominated by secondary pores dissolved by the leaching atmospheric water and that the intensity of leaching determine the porosity characteristics of the reservoirs. The reservoirs went through the following stages: weak compaction during the Early Jurassic (with diagenetic compaction rate of 5.5%–6.5%), atmospheric water leaching during the Middle Jurassic and Cretaceous (with pore increase rate of 4.6%–16.5% and the generation of montmorillonite), strong compaction during the Paleogene (with diagenetic compaction rate at 19.0%–21.5%, precipitation of small amount of calcite, and disappearance of primary pores), and uplifting and preservation during the Neogene with no significant changes in reservoir characteristics. The atmospheric water leaching during the Middle Jurassic and Cretaceous and the intensive compaction in the Paleogene are the two major stages in the evolution of the reservoirs, and determine the genetic types and characteristics of the reservoirs.

Key words sandstone reservoir; genetic type; evolution mechanism; Lower Jurassic; Qaidam basin

收稿日期: 2007-03-15

第一作者简介: 姚根顺 (1962-), 男, 高级工程师, 博士生, 石油地质

石泉滩地区位于南祁连山前柴达木盆地冷湖构造带的西段, 东侧紧邻冷湖三号油田 (图 1)。该区 20 余口探井揭示中、新生界残余地层从下往上为下侏罗统湖西山组和小煤沟组 (后者俗称含油段) 以及古近系路乐河组和下干柴沟组, 缺失下侏罗统大煤沟组、中侏罗统至白垩系以及新近系。地层剥蚀厚度往祁连山前和西侧增加, 而往冷湖三号油田逐渐减少。研究区含油气储层主要发育于小煤沟组, 其岩性为厚层砂岩、含砾砂岩和砾状砂岩, 今埋藏深度为 1 000~ 1 800 m。研究区的构造位置处于阿尔金山和祁连山的结合部位, 因而导致其构造和沉积演化较复杂, 小煤沟组地层经历了早期浅埋、中期不均衡抬升- 剥蚀、晚期深埋及末期又抬升的演化过程, 这既影响了该区的油气成藏条件及富集程度, 又控制了砂岩储层的成岩特征及演化机制^[1]。本文利用石泉滩及邻区 7 口井下侏罗统砂岩储层的岩矿测试及相关资料进行了储层成因及演化机理分析, 认为该区砂岩储层经历了晚侏罗世至白垩纪的大气水淋滤溶蚀, 形成溶蚀孔隙, 但这种溶蚀是不均一的, 冷 103 井及附近溶蚀孔隙发育, 而其他地区不发育或发育较差; 第三纪该区曾经深埋过, 其最大古埋深可达 3 500~ 3 700 m, 在此深埋过程中, 溶蚀孔隙得以较好保存, 而原生孔隙大量消失。根据该区砂岩储层的成因, 可以将其分为压实型、溶蚀型和过渡

型 3 种类型, 后两者是该区油气聚集的主要储层类型。

1 储层岩石学特征

石泉滩地区下侏罗统小煤沟组为辫状河三角洲沉积, 地层岩性主要为棕黄色、浅绿色、浅棕褐色的泥岩、粉砂岩、砂岩和砾岩。砂体储层主要为辫状河三角洲平原辫状分流河道和前缘水下分流河道, 其岩石类型为粉砂岩至砾岩, 含油气储层岩性主要为细中砂岩至砂砾岩。单井储层平均厚度为 227.6~ 827.6 m, 占地层厚度的 28.6%~ 66.4%。储层岩矿类型为岩屑砂岩, 但以刚性碎屑颗粒组分为主。单晶石英颗粒含量为 20.0%~ 40.0%, 平均 29.0%; 长石颗粒含量为 18.0%~ 30.0%, 平均 21.2%; 岩屑颗粒含量为 30.0%~ 55.0%, 平均 49.8%。在岩屑组分中, 以石英岩和花岗岩为主, 它们占岩屑总量的 27.2%; 变质岩 (包括千枚岩、板岩和片岩) 占 13.4%, 其它有少量火成岩、碳酸盐岩和云母碎屑。因此该区小煤沟组砂岩储层的刚性碎屑颗粒 (石英 + 长石 + 石英岩和花岗岩) 含量平均达 77.4%。

小煤沟组砂岩储层的分选中等至较差, 原泥质杂基含量小于 2.0%。这种原杂基主要呈颗粒的包膜状, 包膜厚度约 5.0~ 15.0μm, 其分布比较

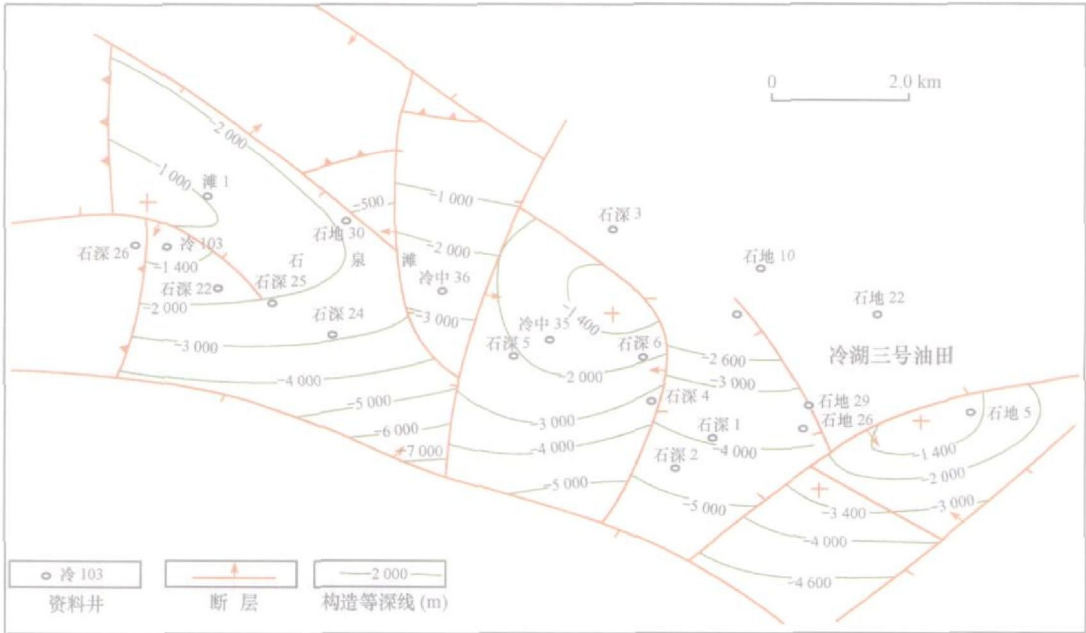


图 1 石泉滩地区下侏罗统顶面构造图

Fig. 1 Structural map showing the top of the Lower Jurassic in Shiquantan area

普遍; 另一种泥质杂基分布于溶蚀孔隙中, 含量 2.0% ~ 4.5%。粘土矿物 X-衍射分析表明其成分主要为蒙脱石和伊-蒙混层。砂岩的胶结物主要为方解石, 偶见石英次生加大, 扫描电镜下还可观察到少量自生钾长石和钠长石。砂岩中的胶结物总量一般小于 2.5%, 平均为 0.5%, 砂岩储层的胶结作用对其储集空间的影响很小。

2 储层成岩特征及成因类型

2.1 成岩演化阶段

石泉滩地区小煤沟组地层的 R_o 为 0.62% ~ 0.99% (图 2), 平均为 0.70%, 处于晚成岩 A_1 晚期— A_2 早期的成岩演化阶段。冷 103 井小煤沟段储层石英包裹体的均一温度 (图 3) 主要位于 100~120℃, 其次为 80~100℃ 和 140~160℃。不同产状的矿物包裹体的均一温度基本一致, 裂缝中自生石英颗粒包裹体的均一温度平均为 112.7℃, 石英颗粒表面的群体包裹体的均一温度平均为 119.5℃, 而石英颗粒边上的包裹体均一温度平均为 102.4℃。从石英包裹体的均一温度也表明小煤沟组砂岩处于晚成岩 A_1 晚期— A_2 早期的成岩演化阶段。从砂岩的压实程度也可判断其成岩演化阶段, 据岩石显微镜观察, 该区砂岩的碎屑颗粒之间以点-线和线-线接触为主 (图 4a b), 也见到凹-凸接触, 表示砂岩已进入晚成岩演化阶段。

2.2 压实及溶蚀作用

研究区小煤沟组砂岩的胶结作用较弱, 并不

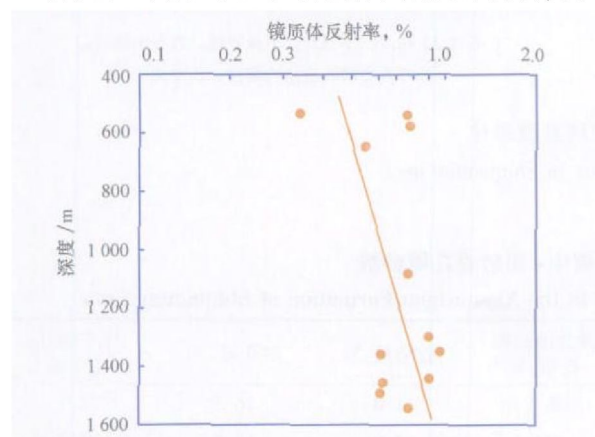


图 2 石泉滩地区地层镜质体反射率与深度的关系
Fig. 2 Relationship between vitrinite reflectance and depth for the reservoirs in Shiquantan area

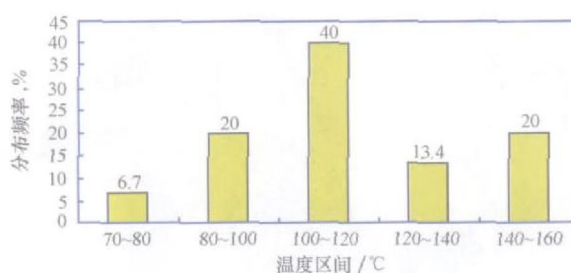


图 3 石泉滩地区储层中石英包裹体的均一温度
Fig. 3 Homogenization temperatures of quartz inclusions from reservoirs in Shiquantan area

是影响砂岩成岩作用和储集性质的重要因素, 而压实作用和溶蚀作用控制了该区砂岩储层的成岩特征和储集性质。为了定量计算砂岩的压实量, 砂岩原始孔隙度据其分选性和粒径, 取其平均值为 36%; 溶孔量则从铸体岩石薄片下的溶孔量经微孔隙指数校正获得, 其校正公式如下^[2]:

溶孔量

$$\Phi_{dis} = \Phi_{sdi} \div (1 - I_{\Phi}) \quad (1)$$

微孔隙度指数

$$I_{\Phi} = (\Phi_p - \Phi_s) \div \Phi_p \quad (2)$$

式中: Φ_p 为今孔隙度, %; Φ_s 为薄片总面孔率, %; Φ_{sdi} 为薄片溶孔面孔率, %; I_{Φ} 为微孔隙度指数, 小数; Φ_{dis} 为溶孔量, %。

据此获得该区小煤沟组岩屑中-粗砂岩和含砾砂岩的孔隙参数 (表 1), 砂岩压实量为 25.1% ~ 27.0%, 占原始孔隙度的 68.3% ~ 75.0%, 占砂岩总孔隙损失量的 90.8% ~ 94.6%。显然, 压实量是该区砂岩原生孔隙损失的主要控制因素。这是我国叠合盆地砂岩成岩作用的较普遍特征^[3 4]。砂岩压实作用的控制因素较多^[5~12], 该区砂岩经受的热成熟度是比较高的, 所以热埋藏成岩压实作用是砂岩压实作用强的主要机理。

该区砂岩的较强压实作用已使原生孔隙大大消失, 从表 1 可知现今砂岩的原生孔隙度只有 7.0% ~ 9.9%, 但目前砂岩孔隙度最高仍达 26.4%, 这与该区砂岩的溶蚀强有关。溶蚀作用程度决定了该区小煤沟组砂岩储层的孔隙发育程度。关于砂岩的溶蚀作用, 国内外已开展了大量研究^[13~16], 砂岩溶孔量与今孔隙度有很好的相关性, 即砂岩今孔隙度的增加主要是由溶蚀孔隙贡献的。从岩石铸体薄片和扫描电镜的观察表明局部地区砂岩的溶蚀作用强烈, 被溶蚀的成分主要

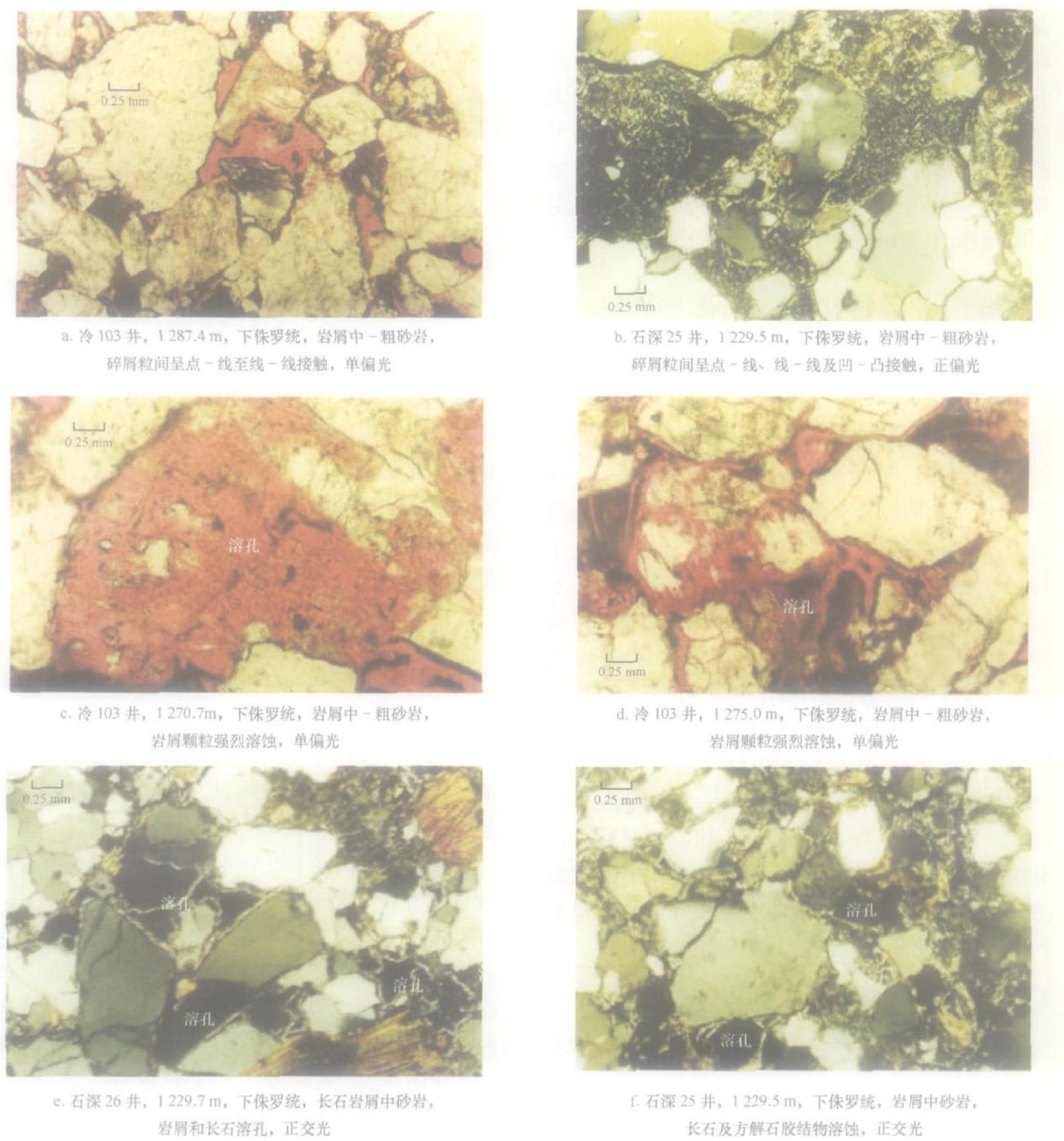


图 4 石泉滩地区储层显微照片

Fig.4 Micrograph of reservoirs in Shiquantan area

表 1 石泉滩地区小煤沟组岩屑中-粗砂岩孔隙参数

Table 1 Pore parameters of medium-granular sandstone in the Xiaomeigou Formation of Shiquantan area

井 号	原始孔隙度, %	今孔隙度, %	薄片面孔率, %	薄片溶孔面孔率, %	胶结量, %	溶孔量, %	压实减孔量, %
冷 103 井	36	26.4	4.5	2.8	1.0	16.5	25.1
石深 25 井	36	19.1	3.0	1.9	2.0	12.1	27.0
石深 1 井	36	14.4	2.3	0.8	0.8	5.0	25.8
冷中 35 井	36	13.1	1.7	0.6	1.5	4.6	26.0

为岩屑和长石颗粒, 少量为方解石胶结物。在所观察的井中, 溶蚀最强者为冷 103 井, 该井在小煤沟组 1 260.0~1 287.0 m 井段砂岩的岩屑和长石颗粒受到强烈的溶蚀, 其溶孔量平均达 16.5%。石深 25 井的溶蚀强度次之, 溶孔量平均为 12.1% (图 4c, d); 石深 26 井砂岩的溶蚀程度与石深 25 井相似 (图 4e, f), 而石深 1 井、冷中 35 井以及冷湖三号地区砂岩的溶蚀作用弱, 甚至未发生明显的溶蚀, 其溶孔量一般小于 5.0%。

2.3 成因类型

从该区砂岩储层的成岩作用特征及其与储集性质的关系, 把储层的成因类型分为压实型、溶蚀型和过渡型等 3 种类型。它们在成岩特征和储集性质上有明显差异 (表 2)。溶蚀型储层主要分布于冷 103 井区及往北和往西地区, 而压实型储层分布于该区的东南侧及冷湖三号地区。

压实型指储层在埋藏成岩过程中经受了较强的成岩压实作用, 而溶蚀作用很弱或基本未发生溶蚀作用。砂岩碎屑颗粒之间为点-线、线-线及凹-凸接触, 成岩压实量大于 24.0%。砂岩的溶蚀作用很弱, 岩石铸体薄片下的溶孔面孔率基本小于 0.5%, 经微孔隙度指数校正的溶孔量小于 5.0%, 储层总孔隙度常小于 13.0%, 渗透率小于 $5.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。另一成岩特征是粘土矿物组合以高岭石为主, 其含量为 69.3%; 其次为蒙脱石, 其含量为 23.5%, 少量绿泥石和伊利石, 也可见到高岭石向蒙脱石的轻微转化。石深 1 井、冷中 35 井及冷湖三号地区属于该类储层。

溶蚀型储层的压实作用相似于压实型, 但砂岩的溶蚀作用很强, 其溶蚀量大于 10.0%。因此储层总孔隙度常大于 20.0%, 渗透率大于 $50 \times$

$10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。另一成岩特征是粘土矿物组合以蒙脱石为主, 少量绿泥石和伊利石, 如冷 103 井属于该类型, 其砂岩中的蒙脱石含量达 66.0%, 绿泥石含量为 8.7%, 少量伊利石, 属于蒙脱石-绿泥石组合。而过渡型的成岩特征处于上述两者之间 (表 2)。

3 储层成岩演化机制

3.1 埋藏史

从残余地层层序可知, 该区储层经历了复杂的成岩演化过程。侏罗纪早期小煤沟组储层处于浅埋成岩阶段, 侏罗纪晚期至白垩纪该区的抬升-剥蚀使储层遭受不均一的淋滤溶蚀, 古近纪进入深埋成岩阶段, 新近纪再次抬升剥蚀或处于隆起状态, 即经历了两次埋藏至抬升剥蚀的演化过程 (图 5)。

侏罗系的剥蚀厚度是用泥岩声波时差法和镜质体反射率法恢复的, 石深 7 井由泥岩声波时差推算得到的侏罗系剥蚀厚度约为 620 m (图 6); 石深 3 井由镜质体反射率法恢复得到的侏罗系剥蚀厚度约为 500 m (图 7)。该区侏罗系剥蚀厚度在 500~620 m 之间, 表明小煤沟组储层在侏罗纪并未进入深埋成岩作用阶段。

目前石泉滩地区古近系 R_0 为 0.6% 的深度约为 600~800 m, 而该深度要明显小于处于同一构造带、相同地温梯度的冷科 1 井, 后者下侏罗统 R_0 为 0.6% 的深度约为 2400 m, 加上冷科 1 井第三

表 2 石泉滩地区小煤沟组砂岩储层成因类型的成岩特征
Table 2 Correlation of diagenetic features of various genesis types in the sandstone reservoirs of the Xiaomeigou Formation in Shiquantan area

	溶蚀型	过渡型	压实型
粘土矿物组合	蒙脱石-绿泥石	蒙脱石-高岭石	高岭石-蒙脱石
蒙脱石含量, %	> 60	60~ 30	< 30
压实作用	较强-强, 压实量大于 24.0%		
溶蚀作用	强	中等	弱
溶蚀量, %	> 10.0	10.0~ 5.0	< 5.0

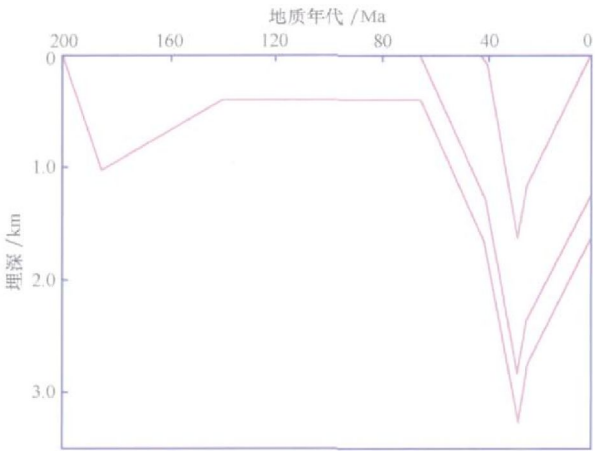


图 5 石泉滩地区冷 103 井小煤沟组地层埋藏史
Fig. 5 Burial history of the Xiaomeigou Formation in Well Leng-103, Shiquantan area

系的剥蚀厚度约为 800~ 1 300 m, 则可推算得到石泉滩地区小煤沟组在古近纪曾经深埋至 3 200~ 3 700 m。

用 C. E. Barker(1988) 提出的镜质体反射率 (R_o) 与地层温度 (T) 的关系式

$$\ln R_o = 0.009 6T - 1.45 \tag{3}$$

得到石泉滩地区小煤沟组的地温为 92.6~ 152.6℃, 平均 107℃, 它与上述用石英包裹体的均一温度是比较接近的。再用该区第三纪的平均地

温梯度 (2.5℃ /hm), 计算获得的平均古埋藏深度为 3 760 m。

用以下时温指数 (TTI) 与岩屑中- 粗砂岩原生孔隙度 (Φ) 的经验关系式^[3]

$$\lg TTI = - 0.137 0\Phi + 3.0 \tag{4}$$

获得冷 103 井小煤沟组平均 TTI 为 42.7, 它相当于 R_o 为 0.75% 的热成熟度, 与该区的实测值基本一致 (图 2), 换算成地层温度即为 107.7℃, 则相应的古埋藏深度为 3 760 m。这一结果与 (3) 式的计算结果一致。研究区小煤沟组在古近纪曾深埋至 3 200~ 3 760 m, 平均古埋藏深度为 3 480 m。

3.2 成岩演化过程

该区砂岩的胶结物含量平均只有 0.52%, 故未考虑其影响, 而侧重分析压实作用和溶蚀作用的演化过程。成岩过程中压实量的变化是根据某一时期的 TTI 值从式 (4) 获得相应时期的砂岩孔隙度, 再从砂岩的原始孔隙度减去该时期的砂岩

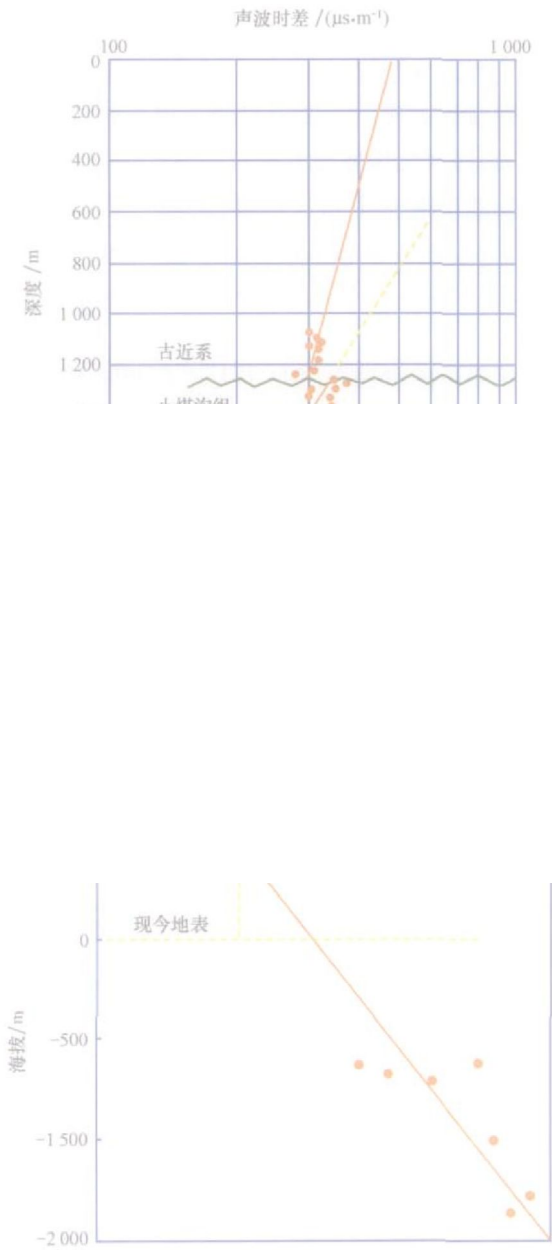


图 7 石深 3 井镜质体反射率法恢复的小煤沟组地层的剥蚀厚度
Fig. 7 Denudation thickness of the Xiaomeigou Formation reconstructed with vitrinite reflectance method in Well Shishen-3

8), 其中大气水淋溶阶段和强压实阶段是决定储层特征的关键成岩演化阶段。早侏罗世为弱压实阶段, 储层处于渐进埋藏成岩阶段, 它经受的最大埋深约 600~ 740 m, 由此引起的成岩压实量约 7.5%~ 8.5%; 中侏罗世至白垩纪为大气水淋溶阶段, 该区的构造抬升使储层长期处于大气水的淋滤溶蚀, 形成发育的溶蚀孔隙, 其增孔量在 4.6%~ 16.5% 之间。伴随砂岩中的长石和岩屑溶蚀的同时, 也形成蒙脱石矿物。从扫描电镜的观察表明, 这种蒙脱石与高岭石和伊利石伴生, 并且与高岭石含量呈负相关性, 而与溶孔量呈正相关性, 表明它可能由高岭石或伊利石转化而成, 也可能是长石和岩屑的溶蚀产物; 古近纪为强压实阶段, 该时期储层曾深埋至 3 200~ 3 760m, 由此引

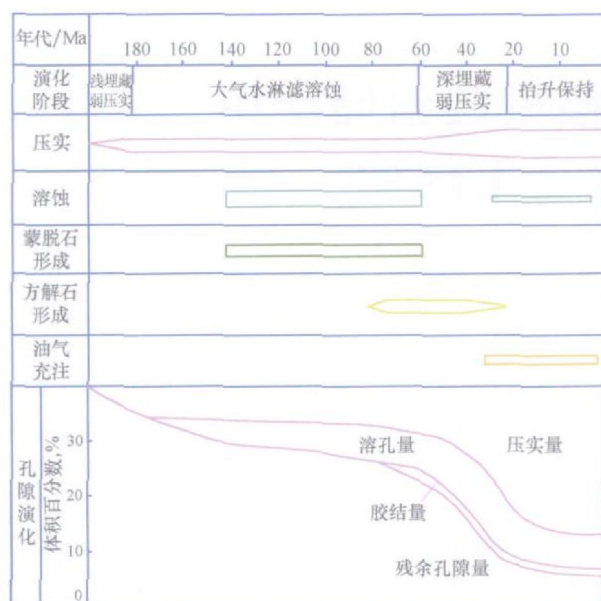


图 8 石泉滩地区小煤沟组砂岩储层成岩演化

Fig. 8 Diagenetic evolution of sandstone reservoirs in Xiamougou Formation, Shiquantan area

起的成岩压实量约 17.0% ~ 19.5%。方解石胶结物可能也为该时期的产物。该阶段是砂岩原生孔隙的主要消失时期, 而大气水淋溶阶段形成的溶孔的消失可能要缓慢得多; 新近纪该区构造又发生隆升, 使已深埋的小煤沟组储层抬升至现今埋藏深度, 这一过程中储层特征基本保持不变。

4 结语

石泉滩地区比较复杂构造背景使下侏罗统小煤沟组砂岩经历了早期弱压实、中期大气水淋溶、晚期强压实以及末期抬升的成岩演化过程, 其中, 中期和晚期的埋藏成岩作用决定了砂岩储层的成岩及物性特征。中期大气水的淋滤溶蚀除了形成不均一分布的、局部发育的溶蚀孔隙, 使其成为决定孔隙体积大小的重要因素外, 还伴生成岩粘土矿物 (即蒙脱石的大量生成)。从扫描电镜观察到的蒙脱石与高岭石、伊利石的伴生关系以及蒙脱石含量与溶孔量呈正相关关系可以判断这种蒙脱石是大气水淋滤溶蚀期间主要是由高岭石或伊利石转化而成, 也不排除是长石和岩屑颗粒溶蚀的副产物。新近纪地层有机酸对小煤沟组砂岩的溶蚀是可能的, 但从我国西部油气盆地中地层有机酸

对砂岩的溶蚀规模分析^[5], 地层有机酸溶蚀产生的溶孔是有限的, 难以达到该区冷 103 井和石深 25 井砂岩的溶蚀规模。晚期强压实过程是砂岩原生孔隙的主要消失时期, 它使未经历大气水强淋溶的储层变得很致密。因此从油气聚集的角度, 只有经历中期大气水淋滤溶蚀的储层才是油气聚集的良好储层, 而此类储层分布于中侏罗纪至白垩纪砂岩的有利淋滤溶蚀带。

参 考 文 献

- 1 刘云田, 杨少勇. 柴达木盆地北缘侏罗系砂岩孔隙发育特征 [J]. 石油与天然气地质, 2001, 22(3): 267~269
- 2 罗明高. 定量储层地质学 [M]. 北京: 地质出版社, 1998
- 3 寿建峰, 张惠良, 斯春松, 等. 砂岩动力成岩作用 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2005
- 4 寿建峰, 斯春松, 朱国华, 等. 塔里木盆地库车坳陷下侏罗统砂岩储层性质的控制因素 [J]. 地质论评, 2001, 47(3): 273~277
- 5 寿建峰, 朱国华, 张惠良. 构造侧向挤压与砂岩成岩压实作用——以塔里木盆地为例 [J]. 沉积学报, 2003, 21(1): 90~95
- 6 寿建峰, 斯春松, 张达. 库车坳陷下侏罗统岩石古应力场与砂岩储层性质 [J]. 地球学报, 2004, 25(4): 447~452
- 7 寿建峰, 张惠良, 沈扬, 等. 中国油气盆地砂岩储层的成岩压实机制分析 [J]. 岩石学报, 2006, 22(8): 2165~2170
- 8 Maxwell J C. Influence of depth, temperature and geologic age on porosity of quartzose sandstone [J]. AAPG Bulletin, 1964, 48(5): 697~709
- 9 Schmoker J W, Gautier D L. Sandstone porosity as function of thermal maturity—an approach to porosity comparison and prediction [J]. Geology, 1988, 16(11): 1697~1703
- 10 Soherer M. Parameters influencing porosity in sandstones: a model for sandstone porosity prediction [J]. AAPG Bulletin, 1987, 71(5): 684~689
- 11 刘成林, 朱筱敏, 朱玉新, 等. 不同构造背景天然气储层成岩作用及孔隙演化特点 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(6): 746~753
- 12 蔡进功, 谢忠怀, 田芳, 等. 济阳坳陷深层砂岩成岩作用及孔隙演化 [J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(1): 84~88
- 13 李汶国, 张晓鹏, 钟玉梅. 长石砂岩次生溶孔的形成机理 [J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(2): 220~223
- 14 朱筱敏, 王英国, 钟大康, 等. 济阳坳陷古近系储层孔隙类型与次生孔隙成因 [J]. 地质学报, 2007, 81(2): 197~204
- 15 季汉成, 徐珍. 深部碎屑岩储层溶蚀作用实验模拟研究 [J]. 地质学报, 2007, 81(2): 213~218
- 16 刘建清, 赖兴运, 于炳松, 等. 成岩作用的研究现状及展望 [J]. 石油实验地质, 2006, 28(1): 65~72, 77

(编辑 陈喜禄)