

基于储层构型理论的致密砂岩成藏过程分析

——以松辽盆地古龙向斜葡萄花油层为例

刘芳^{1,2}, 刘性全³, 刘宗堡², 管宪莉⁴, 张云峰², 刘云燕³

[1. 东北石油大学 计算机与信息技术学院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 东北石油大学 地球科学学院, 黑龙江 大庆 163318;

3. 中国石油 大庆油田有限责任公司 第八采油厂, 黑龙江 大庆 163514;

4. 中国石油 大庆油田有限责任公司 第二采油厂, 黑龙江 大庆 163416]

摘要:针对致密砂岩储层非均质性强和成藏过程复杂,利用岩心、岩石薄片、扫描电镜和实验分析测试等资料,基于储层构型理论的等级体系划分和成因单元识别,综合研究松辽盆地古龙向斜葡萄花油层的岩石学特征、物性特征、孔喉结构特征和成岩特征,进而对致密砂岩储层的致密史与成藏史时空耦合关系进行分析。结果表明:葡萄花油层由8种岩相成因单元、4种微相成因单元和1种亚相成因单元的3个等级体系级次组成;葡萄花油层砂岩类型主要为长石岩屑砂岩,粒度细,分选-磨圆中等,方解石充填为主,孔隙度平均值为7.63%,渗透率平均值为 $0.42 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙类型以粒间溶蚀扩大孔为主,喉道类型主要发育收缩状、断面状和弯片状;葡萄花油层经历了两期胶结和一期溶蚀的成岩演化序列,目前处于中成岩阶段A期;葡萄花油层具有多期成藏和选择性充注的动态演化过程,得出向斜区油气富集的优质储层为水下河道微相、厚层席状砂微相及二者附近连通的薄层席状砂微相。

关键词:成藏过程分析;储层构型理论;致密砂岩;葡萄花油层;古龙向斜;松辽盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Hydrocarbon accumulation analysis of tight sandstone based on reservoir architecture theory—A case from Putaohua reservoir in the Gulong syncline, Songliao Basin

Liu Fang^{1,2}, Liu Xingquan³, Liu Zongbao², Guan Xianli⁴, Zhang Yunfeng², Liu Yunyan³

(1. School of Computer & Information Technology, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China;

2. School of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China;

3. NO. 8 Oil Production Plant of Daqing Oilfield Limited Liability Company, Daqing, Heilongjiang 163514, China;

4. NO. 2 Oil Production Plant of Daqing Oilfield Limited Liability Company, Daqing, Heilongjiang 163416, China)

Abstract: Tight sandstone reservoir is highly heterogeneous and its hydrocarbon accumulation process is complicated. The petrologic features, physical properties, pore throat structures and diagenesis of the Putaohua oil reservoir in Gulong syncline, Songliao Basin, were studied via a combination of core, thin section, SEM and experimental data. Then the spatio-temporal coupling relationship between the tightening history and hydrocarbon accumulation history of tight sandstone reservoir was analyzed based on the hierarchical system of architecture theory and the identification of genetic units. Results indicate that (1) hierarchically the Putaohua oil reservoir is composed of 8 lithofacies units, 1 subfacies unit, and 4 microfacies units in terms of genesis; (2) the reservoir sandstone is mainly feldspar lithic sandstone with fine-grain size, medium sorting and rounding, mostly calcite cement filling, an average porosity of 7.63% and an average permeability $0.42 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$. The majority of the pores are intergranular dissolution pores, developing shrinkage, fracture, and curved-plate throats; (3) the Putaohua oil reservoir is currently in Period A of the anadiagenetic stage after two periods of cementation and one period of dissolution during the diagenetic evolutionary history; (4) the oil enrichment of the Putaohua reservoir is attributed to the dynamic evolutionary process of multiphase accumulation and

收稿日期:2017-09-16;修订日期:2018-01-20。

第一作者简介:刘芳(1983—),女,博士研究生,副教授,油气田开发地质学。E-mail:lliuifang1983@126.com。

通讯作者简介:刘宗堡(1982—),男,教授,储层沉积学与油气成藏机理。E-mail:lzbdqpi@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41502136);国家科技重大专项(2017ZX05001003;2016ZX05054009)。

selective charging. And we come to the conclusion that microfacies of the underwater channel, thick sheet sandstone, and the interconnected thin sheet sandstone close to the above two areas are high-quality hydrocarbon-enriched reservoirs in the syncline.

Key words: accumulation process analysis, reservoir architecture theory, tight sandstone, Putaohua oil reservoir, Gulong syncline, Songliao Basin

随着全球常规油气资源新增储量的逐渐减少,以及油气勘探开发新理论和新技术的不断创新,非常规油气藏中的致密砂岩储层逐渐成为勘探热点^[1-2]。目前全球关于致密砂岩的定义界限^[3-4]、成因机理^[5]、发育特征^[6]和资源潜力^[7]等进行了大量研究,但从未考虑砂体沉积作用造成的不同尺度储层非均质性差异。松辽盆地古龙向斜葡萄花油层发育大面积连片的致密砂岩储层,以往针对该区研究主要为油气来源^[8]、成藏期次^[9]、沉积体系^[10]和输导体系^[11]等,而致密砂岩储层研究的核心问题是储层质量时空演化特征^[12-13],其决定了致密砂岩储层的成藏动态过程^[14]和优质储层分布^[15]。因此,本文利用岩心、岩石薄片、扫描电镜和室内分析化验等资料,首先构建出沉积成因相关和特征参数匹配的多级次储层构型单元,进而研究沉积作用与成岩作用共同约束下的储层致密史与成藏史时空耦合关系,其成果对指导致密砂岩优质储层有效预测具有重要意义。

1 区域地质概况

古龙向斜构造上位于松辽盆地中央坳陷区齐家—古龙凹陷南端,其周边发育东北新肇鼻状构造、东南新站鼻状构造和西北英台鼻状构造3个正向构造单元,整体表现为继承性发育的“三鼻夹一洼”构造格局(图1)。姚家组一段葡萄花油层为区内主力产油层位,受盆地水退期北部长轴物源与西部短轴物源双重影响,发育多旋回砂泥薄互层的浅水三角洲前缘亚相沉积,垂向上细分为9个小层和13个时间单元,沉积微相类型主要为连续条带状—断续土豆状的水下河道和坳状—连片状各类席状砂,河口坝等微相不发育^[16]。古龙向斜葡萄花油层顶面断层表现为平面密集成带、剖面反“y”字型、走向近北北西、倾向多方位、密度低和规模小等特征。受葡萄花油层地层埋深大、成岩作用强、颗粒直径小、泥质含量高和后期构造变动弱等影

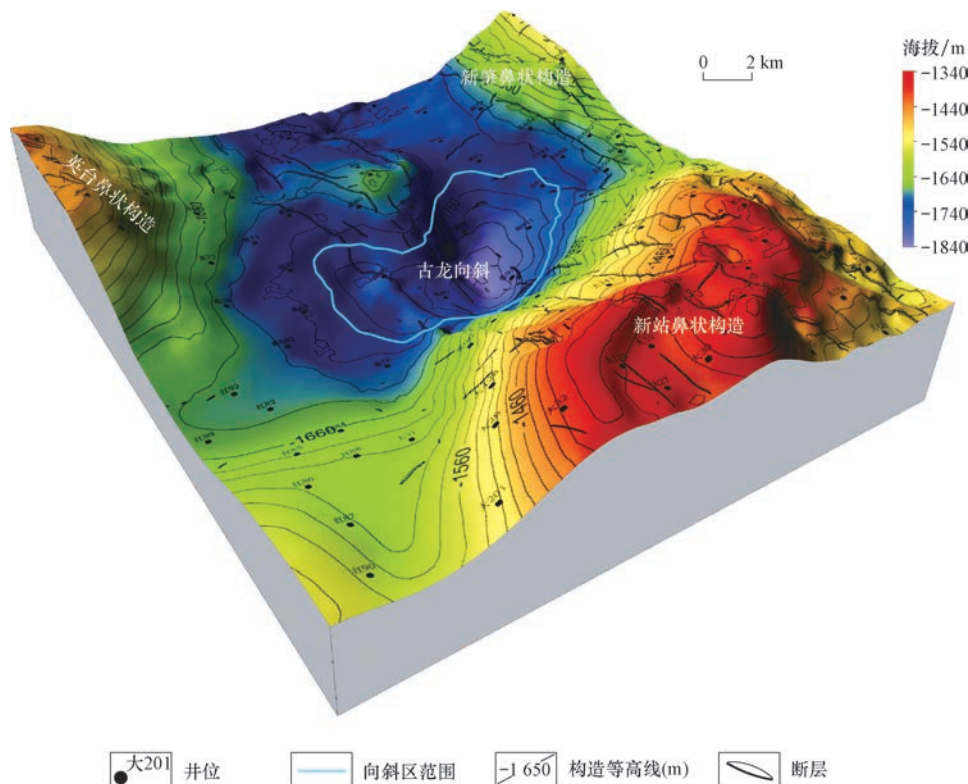


图1 古龙向斜葡萄花油层构造位置

Fig. 1 Structural location of Putaohua oil reservoir in the Gulong syncline

响,研究区主要发育油气分布连片但试油产能差异较大的致密砂岩油气藏,如目前区内已经钻遇7口高产工业油气流井和16口低产见油气显示井^[17]。

2 葡萄花油层储层基本地质特征

通过对古龙向斜葡萄花油层13口取心井430 m岩心观察描述,首先识别出8种岩相成因单元(a_1 . 块状层理泥岩、 a_2 . 水平层理粉砂岩、 a_3 . 平行层理细砂岩、 a_4 . 槽状交错层理细砂岩、 a_5 . 透镜状层理粉砂岩、 a_6 . 波状交错层理细砂岩、 a_7 . 板状交错层理细砂岩、 a_8 . 波状层理粉细砂岩)、4种微相成因单元(f_1 . 水下河道、 f_2 . 厚层席状砂、 f_3 . 薄层席状砂、 f_4 . 水下分流间泥)和1种亚相成因单元(三角洲前缘亚相)的3个等级体系级次,进而依据岩心、测井和地震资料对低级次成因单元组成高级次成因单元的类型及比例进行统计,然后选取岩性和层理相一致的典型岩相为岩心取样和基本储层构型单元,并进行相关的实验分析测试(粒度、分选、物性、岩石薄片、扫描电镜、压汞),最终构建出特

征参数匹配和沉积成因相关的致密砂岩多尺度储层构型单元地质模型(图2)。

2.1 储层岩石学特征

碎屑岩成分和结构是研究储层岩石学特征的主要依据。通过对研究区112块岩石薄片鉴定:砂岩类型主要为长石岩屑砂岩,其次为岩屑长石砂岩和岩屑砂岩;颗粒粒级主要以细砂和粗粉砂为主;骨架颗粒主要由石英、长石和岩屑三部分组成;碎屑组分主要为岩屑,其次为长石和石英,其中岩屑平均含量为33.6%,以火山岩岩屑为主,同时见少量变质岩岩屑,长石平均含量为27.3%,主要由正长石和钾长石组成,见少量斜长石,石英平均含量为20.4%;颗粒分选性中等-较好,磨圆度中等,呈次棱角状-次圆状,填隙物主要为含铁方解石等碳酸盐类(图3a)。

2.2 储层物性特征

通过对研究区433个岩心样品实测物性数据统计,孔隙度平均值为7.63%(其中水下河道微相为

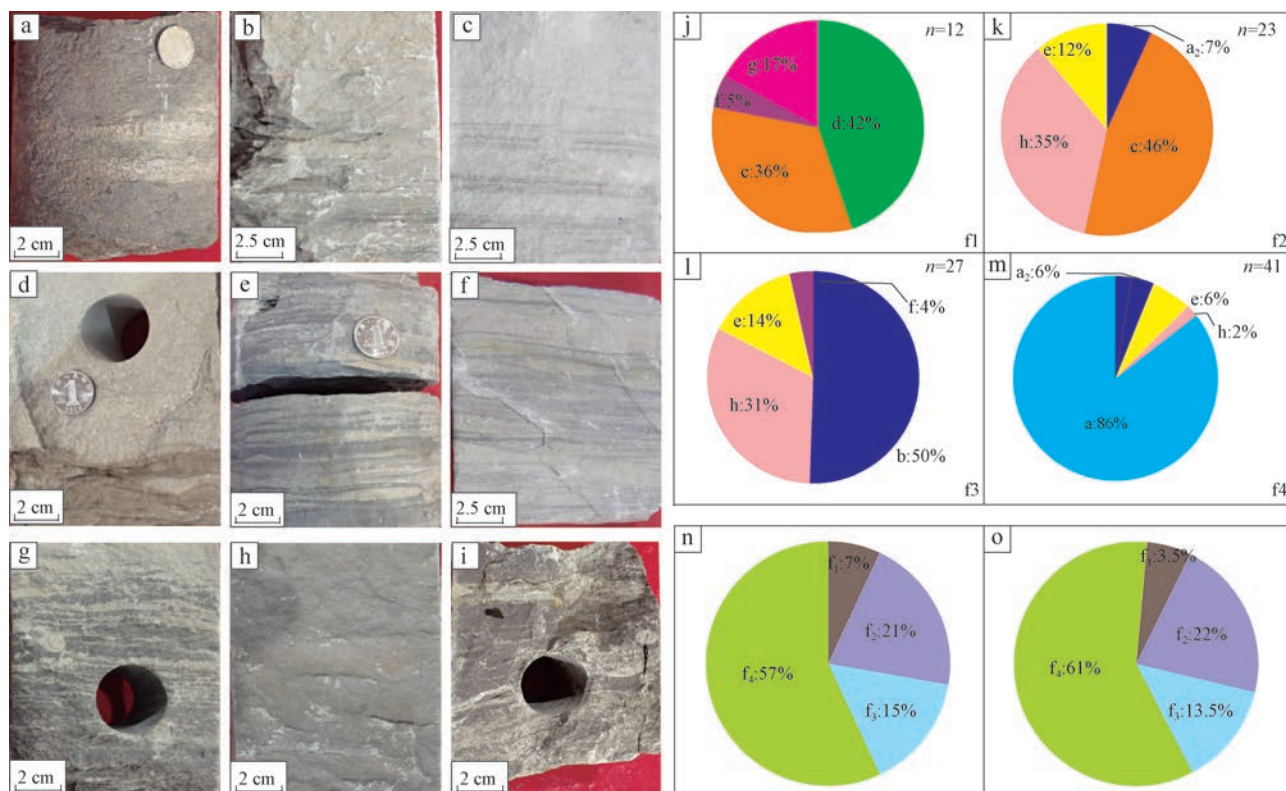


图2 古龙向斜葡萄花油层储层构型单元类型及组合

Fig. 2 Styles of architecture element and their combination of the Putaohua oil reservoir in the Gulong syncline

a. 英34井,埋深1 866.42 m,块状层理泥岩;b. 英86井,埋深1 958.59 m,水平层理粉砂岩;c. 英85井,埋深1 870.69 m,平行层理细砂岩;d. 英941井,埋深1 933.96 m,槽状交错层理细砂岩;e. 古655井,埋深1 879.46 m,透镜状层理粉砂岩;f. 英81井,埋深1 872.09 m,波状交错层理细砂岩;g. 英88井,埋深1 954.11 m;h. 英82井,埋深1 846.95 m,波状层理粉细砂岩;i. 英86井,埋深1 943.31 m,槽状交错层理细砂岩;j. 水下河道微相岩相组成;k. 厚层席状,板状交错层理细砂岩砂微相岩相组成;l. 薄层席状砂微相岩相组成;m. 水下分流间微相岩相组成;n. 葡萄花油层沉积微相厚度比例组成;o. 葡萄花油层沉积微相体积比例组成

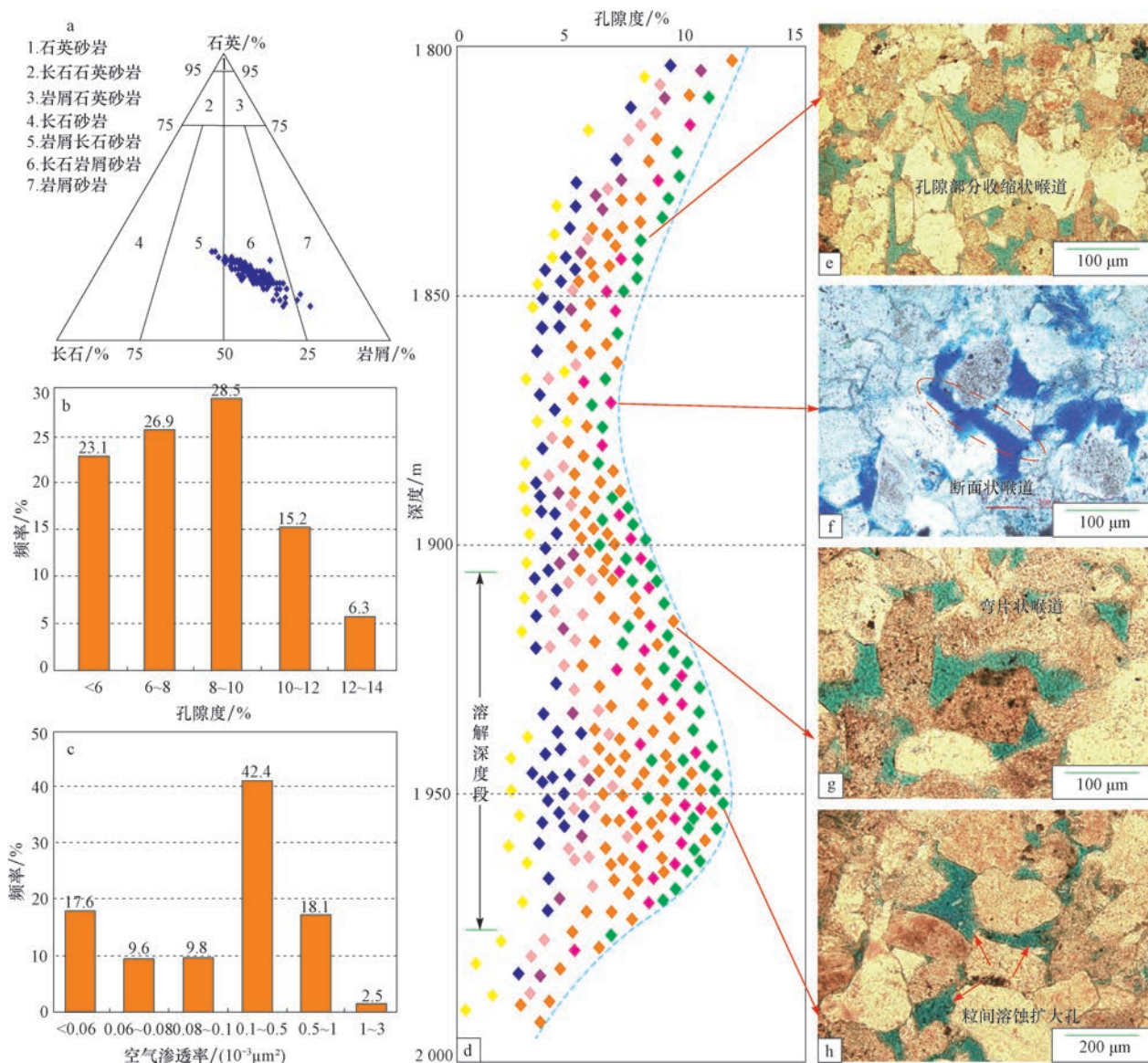


图3 古龙向斜葡萄花油层储层发育特征

Fig. 3 Reservoir developmental features of Putaohua oil reservoir in the Gulong syncline

a. 葡萄花油层砂岩岩类组成; b. 葡萄花油层孔隙度分布; c. 葡萄花油层空气渗透率分布; d. 岩心孔隙度垂向分布; e. 收缩状喉道, 英82井, 埋深1841.2 m, 单偏光; f. 断面状喉道, 英85井, 埋深1873.6 m, 单偏光; g. 弯片状喉道, 古69井, 埋深1918.1 m, 单偏光; h. 粒间溶蚀扩大孔, 英91井, 埋深1954.5 m, 单偏光

10.0%、厚层席状砂微相为7.9%、薄层席状砂微相为4.1%), 主峰分布在8%~10%, 小于12%的占93.7%(图3b); 空气渗透率平均值为 $0.42 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (其中水下河道微相为 $0.68 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、厚层席状砂微相为 $0.45 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 、薄层席状砂微相为 $0.28 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$), 主峰分布在 $(0.1 \times 10^{-3} \sim 0.5 \times 10^{-3}) \mu\text{m}^2$, 小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的占97.5%(图3c)。单对数坐标下渗透率与孔隙度具有较好的正相关性, 结合岩石薄片观察分析, 葡萄花油层属于典型的孔隙型致密砂岩储层(图4)。岩心实测孔隙度显示在1910~1970 m附近发育明显次生溶蚀孔隙带, 且不同类型微相的相同

岩相单元孔隙度值存在一定差异, 表明葡萄花油层受后期成岩作用差异溶蚀影响次生孔隙较发育(图3d)。

2.3 储层孔喉结构特征

岩石薄片鉴定表明研究区孔隙类型以粒间溶蚀扩大孔为主, 其次为碳酸盐胶结物内溶孔和原生缩小粒间孔, 少量粒内溶孔、长石铸模孔和特大孔(图3h)。喉道按有效性由好至差可识别出3种: 收缩状喉道(图3e)、断面状喉道(图3f)和弯片状喉道(图3g)。压汞资料分析表明水下河道微相(岩相 a_3 和岩相 a_4)毛细管压力曲线为分选中等略粗歪度型, 孔喉半径0.01~

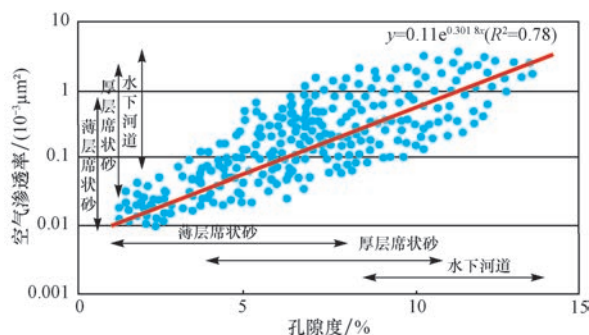


图4 古龙向斜葡萄花油层孔-渗关系

Fig. 4 Relationship between porosity and permeability of Putaohua oil reservoir in the Gulong syncline

0.63 μm , 最大进汞饱和度为 68% ~ 87%, 最大退出效率 26% ~ 38%, 汞饱和度中值压力 4.2 ~ 13.8 MPa, 排驱压力 1.3 ~ 4.2 MPa。席状砂微相(岩相 a_2 、岩相 a_3 和岩相 a_8)毛细管压力曲线为分选较好细歪度型, 孔喉半径 0.006 ~ 0.25 μm , 最大进汞饱和度为 33% ~ 53%, 最大退出效率 21% ~ 32%, 汞饱和度中值压力

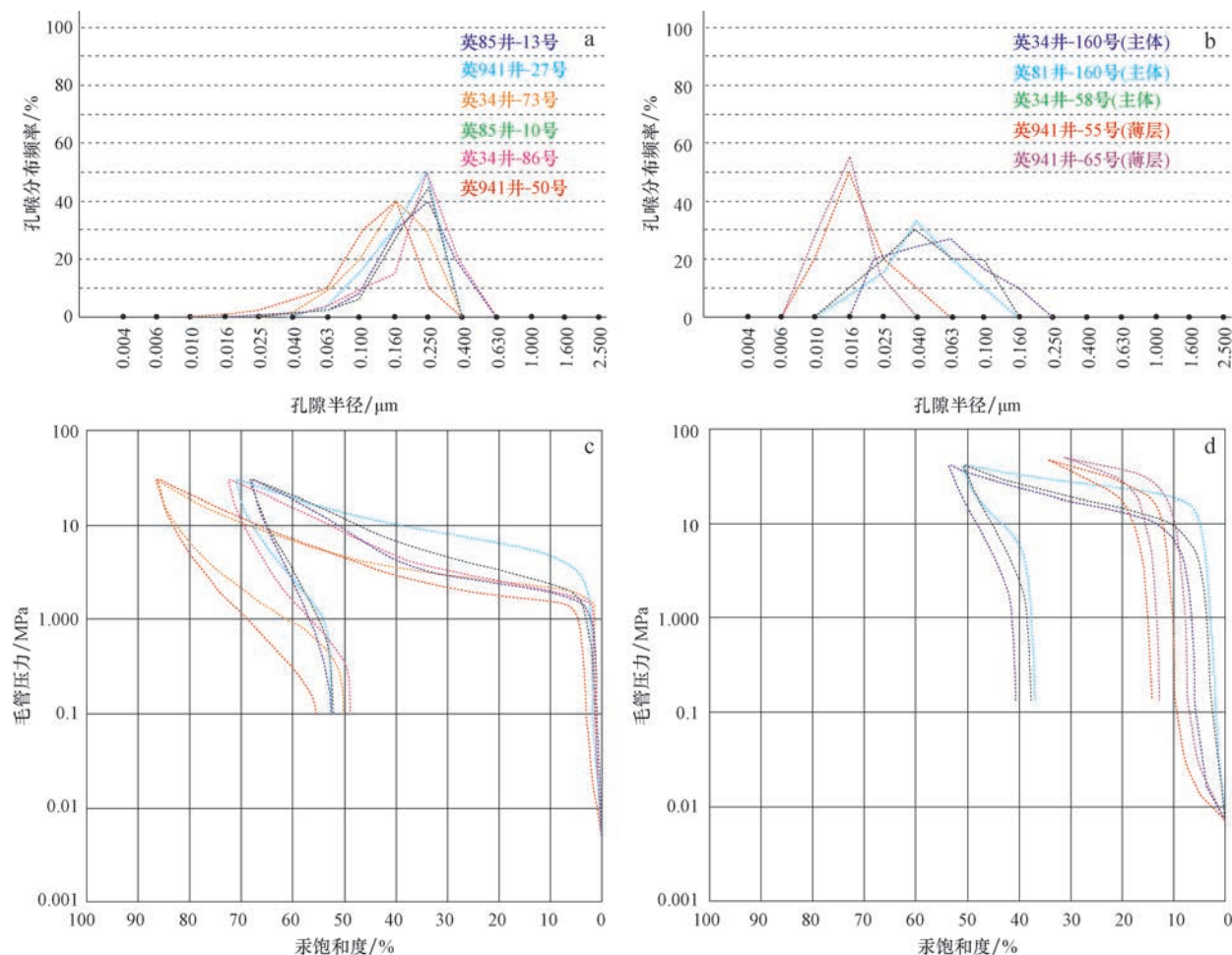


图5 古龙向斜葡萄花油层储层孔喉结构特征

Fig. 5 Characteristics of the pore throat structure of Putaohua oil reservoir in the Gulong syncline

a. 水下河道微相孔喉半径分布; b. 席状砂微相孔喉半径分布; c. 水下河道微相压汞曲线特征; d. 席状砂微相压汞曲线特征

22.5 ~ 30.7 MPa, 排驱压力 4.2 ~ 11.3 MPa(图5)。上述分析表明, 水下河道微相的孔径分布范围和孔喉连通情况要优于席状砂微相, 而席状砂微相中厚层席状砂微相要优于薄层席状砂微相。

3 储层成岩作用特征

3.1 压实-压溶作用

古龙向斜葡萄花油层地层埋深介于 1 800 ~ 2 000 m, 属中等强度压实。岩石薄片鉴定表明: 碎屑颗粒紧密接触排列, 呈线性-凹凸接触, 见云母和岩屑挤压变形、刚性颗粒破裂纹(图6a)。二氧化硅受压溶作用影响以胶结物形式沉淀(图6b), 且发育明显的石英次生加大边(图6c)。

3.2 胶结作用

古龙向斜葡萄花油层胶结物类型有碳酸盐类、粘

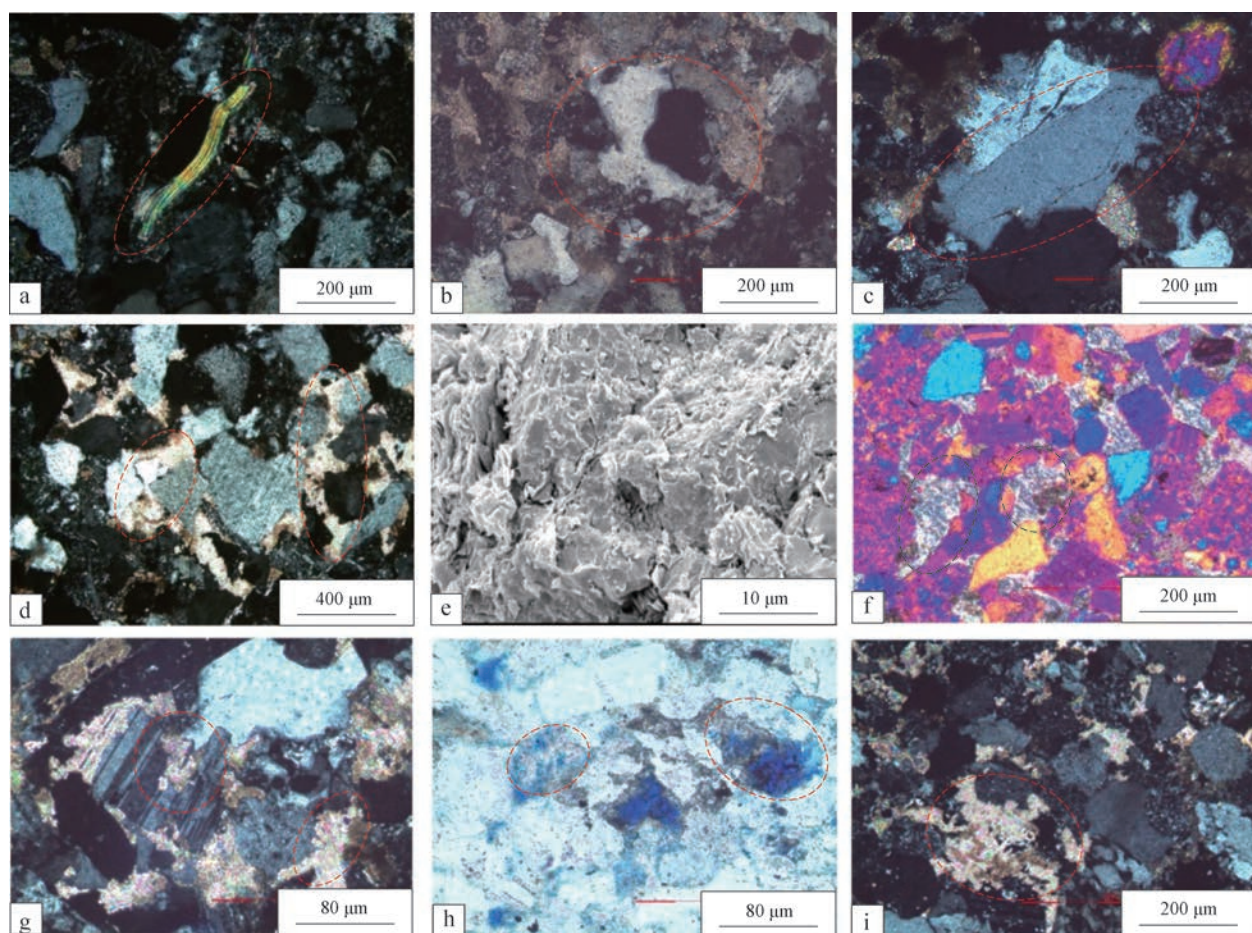


图6 古龙向斜葡萄花油层成岩作用类型和特征

Fig. 6 Diagenetic types and characteristics of Putaohua oil reservoir in the Gulong syncline

a. 白云母弯曲变形,英854井,埋深1 783 m,正交光;b. 压溶作用,英941井,埋深1 930 m,正交光;c. 石英Ⅱ级加大,英941井,埋深1 931 m,正交光;d. 方解石亮晶胶结,英97井,埋深1 922.7 m,正交光;e. 颗粒表面贴附伊利石,英97井,埋深1 906.9 m,扫描电镜;f. 硬石膏连晶胶结,古623井,埋深1 905 m,正交光;g. 亮晶方解石胶结并交代更长石和岩屑,古623井,埋深1 874.8 m,正交光;h. 方解石胶结物内溶孔与长石粒内溶孔,英85井,埋深1 866.5 m,单偏光;i. 方解石重结晶,交代石英、岩屑、长石,古623井,埋深1 874.87 m,正交光

土矿物、硅质和硬石膏。碳酸盐类胶结主要是方解石和铁方解石胶结充填,同时含有少量亮晶铁白云石,呈晶粒镶嵌状、衬边状、连晶状3种方式,多为细晶镶嵌充填于颗粒之间(图6d)。粘土矿物胶结主要有伊利石、绿泥石,同时含少量高岭石及伊蒙混层矿物(图6e)。硅质胶结物以自生石英最为发育,见少量玉髓,自生石英呈Ⅱ级次生加大或以硅质胶结形式出现充填于孔隙中,表明沉积时水动力作用较弱(图6e)。自生硬石膏较为常见,呈亮晶、连晶式胶结充填孔隙(图6f)。

3.3 交代作用

交代作用对储层物性影响较小,古龙向斜葡萄花油层主要发生的交代作用为方解石与硬石膏交代石英、长石、岩屑,其形成从边部开始,被交代矿物镜下呈港湾状(图6g)。交代作用时间基本与方解石胶结物

的形成时间一致,发生于溶蚀作用之前。

3.4 溶解作用

古龙向斜葡萄花油层经历了强烈的压实与压溶作用后,原生孔隙大量降低,而地下水及有机酸等溶剂溶解作用生成的次生孔隙对储层物性进行了很大程度改善。葡萄花油层溶解作用主要为长石、岩屑和方解石胶结物的溶解,以及少量硬石膏与浊沸石胶结物溶解(图6h)。

3.5 重结晶作用

古龙向斜葡萄花油层发生重结晶作用主要有方解石胶结物与硬石膏胶结物,同时可见高岭石多形转变作用。方解石与硬石膏重结晶作用主要显示为粉晶—细晶方解石、硬石膏重结晶后形成粗大晶体,多以连晶方式胶结碎屑颗粒(图6i)。

4 成岩演化序列及成藏过程

4.1 成岩作用阶段划分

采用碎屑岩储层成岩阶段划分标准^[18],古龙向斜葡萄花油层现今已经处于中成岩阶段A期,证据如下:①泥岩中干酪根的镜质体反射率 R_o 为0.75%~0.94%;②82块岩样的热解色谱数据显示有机质最大热解峰温范围为351~524℃;③X-衍射分析显示粘土矿物中伊-蒙混层粘土矿物为有序混层,混层中蒙皂石层含量为15%~25%;④石英加大级别为Ⅱ级,颗粒主要为线-凹凸接触,孔隙中充填有含铁方解石;⑤次生溶蚀孔隙发育,表现为中成岩阶段干酪根发生热降解,形成大量有机酸和 CO_2 对储层进行溶解改造。

4.2 成岩演化序列建立

基于上述古龙向斜葡萄花油层储层成岩作用类型及阶段分析,对比各种自生矿物与成岩作用形成的相对顺序^[19],同时系统对比研究区周边鼻状构造区和斜坡区储层发育特征,总结出葡萄花油层储层成岩演化序列:机械压实—石英、长石加大,高岭石充填孔隙—方解石胶结、交代—硬石膏胶结、交代—长石、岩屑、方解石溶解—石英二级加大—方解石和硬石膏重结晶—伊利石、绿泥石充填(图7)。

4.3 孔隙度演化历史标定

古龙向斜葡萄花油层为继承性古构造背景下的孔

隙型致密砂岩储层,因此,成岩作用是影响沉积物埋藏后储层物性演化的主控因素。成岩作用影响储层物性表现为两方面:机械压实作用与胶结作用使储层孔隙度降低,溶解作用使储层孔隙度增加^[20]。以不同微相的典型岩相为基本储层构型分析单元,利用经验公式恢复各岩相单元的砂岩初始孔隙度^[21],结合孔隙度和铸体薄片面孔率函数关系校正,可以计算出相对应的机械压实前初始孔隙度 Φ_1 、机械压实后剩余孔隙度 Φ_2 、胶结后溶解前孔隙度 Φ_3 和溶解产生次生孔隙度 Φ_4 ^[22-23](表1)。

$$\Phi_1 = 20.91 + 22.90/S_0 \quad (1)$$

$$\Phi_2 = (\text{粒间孔面孔率} + \text{溶蚀孔面孔率}) / \text{总面孔率} \times \text{岩心分析孔隙度}(\%) + \text{胶结物含量}(\%) \quad (2)$$

$$\Phi_3 = \text{粒间孔面孔率} / \text{总面孔率} \times \text{岩心分析孔隙度}(\%) \quad (3)$$

$$\Phi_4 = \text{溶蚀孔面孔率} / \text{总面孔率} \times \text{岩心分析孔隙度}(\%) \quad (4)$$

式中: S_0 为特拉斯克分选系数 $[\text{Trask} = (Q_1/Q_3)^{1/2}]$; Q_1 为第一四分位数,指25%处的粒径大小; Q_3 为第三四分位数,指75%处的粒径大小; Φ_1 为初始孔隙度,%; Φ_2 为机械压实后孔隙度,%; Φ_3 为溶解前胶结后孔隙度,%; Φ_4 为溶解产生孔隙度,%。

岩心实测孔隙度垂向变化显示研究区经历了两期胶结和一期溶蚀(图3),以储层构型理论为主线,选取典型岩相单元对应成岩阶段的多个铸体薄片进行鉴定和面孔率统计^[24],采用算数平均法,分别计算出每期胶结和溶蚀的面孔率值大小,注意区分粒间溶蚀扩大孔和

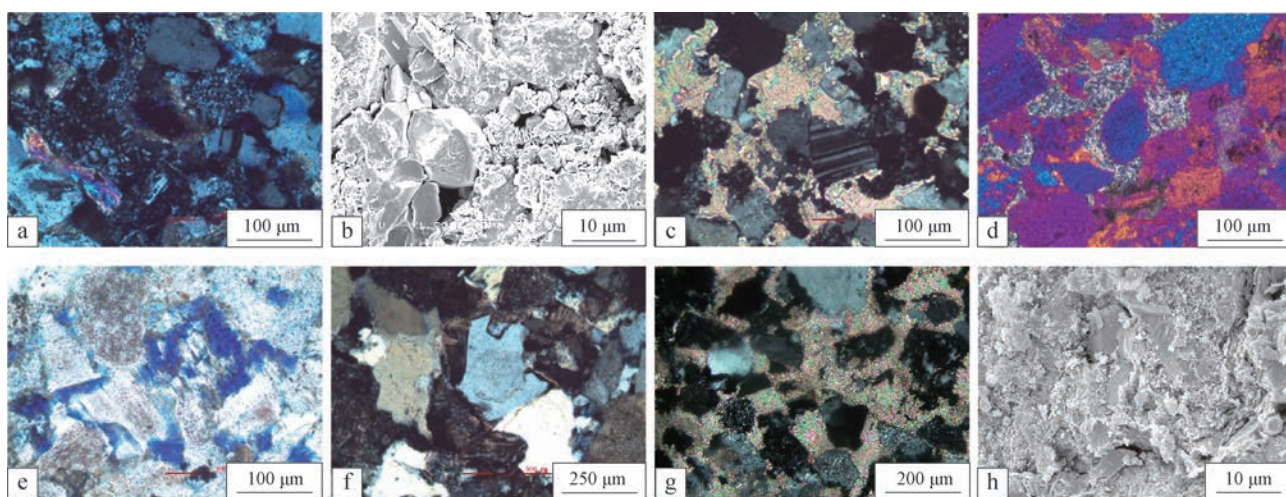


图7 古龙向斜葡萄花油层成岩演化序列

Fig. 7 Diagenetic evolutionary sequence of Putaohua oil reservoir in the Gulong syncline

a. 机械压实,英82井,埋深1 840 m;b. 石英一级加大,高岭石充填,英85井,埋深1 857 m;c. 方解石胶结交代,古655井,埋深1 866 m;d. 硬石膏交代方解石,古623井,埋深1 898 m;e. 长石、岩屑、方解石溶解,英97井,埋深1 922 m;f. 石英二级加大,英86井,埋深1 948 m;g. 方解石重结晶,英941井,埋深1 975 m;h. 伊利石、绿泥石充填,英88井,埋深1 986 m

表 1 古龙向斜葡萄花油层储层参数
Table 1 Putaohua oil reservoir parameters in the Gulong syncline

微相	岩相	特斯拉分选系数	粒度中值/mm	岩心孔隙度/%	总孔隙率/%	粒间孔/%	溶蚀孔/%	胶结物含量/%
水下河道	岩相 a ₃	1.86 ~ 4.86	0.12 ~ 0.22	7.28 ~ 11.24	9.2 ~ 11.4	6.6 ~ 8.4	2.1 ~ 3.7	8.5 ~ 10.6
		2.58(46)	0.18(46)	9.39(46)	10.3(18)	7.7(18)	2.9(18)	9.7(18)
	岩相 a ₄	2.16 ~ 6.82	0.18 ~ 0.28	8.58 ~ 13.26	9.2 ~ 12.3	7.2 ~ 9.6	2.7 ~ 4.3	7.6 ~ 9.5
		2.94(32)	0.21(32)	10.58(32)	11.2(22)	8.0(22)	3.7(22)	8.6(22)
厚层席状砂	岩相 a ₃	1.42 ~ 4.53	0.11 ~ 0.18	6.14 ~ 10.56	7.9 ~ 10.7	5.9 ~ 8.2	1.9 ~ 3.4	9.1 ~ 10.9
		2.26(102)	0.14(102)	9.12(102)	9.6(21)	7.2(21)	2.6(21)	10.1(21)
	岩相 a ₈	1.25 ~ 4.24	0.06 ~ 0.11	4.14 ~ 8.56	6.2 ~ 9.5	5.4 ~ 8.0	1.3 ~ 2.4	9.8 ~ 11.2
		1.97(124)	0.08(124)	6.23(124)	8.4(17)	6.3(17)	2.1(17)	10.5(17)
薄层席状砂	岩相 a ₂	1.04 ~ 3.83	0.02 ~ 0.08	2.14 ~ 7.23	4.4 ~ 8.1	4.2 ~ 6.8	0.8 ~ 1.4	10.5 ~ 12.6
		1.57(58)	0.04(58)	3.43(58)	6.2(15)	5.2(15)	1.0(15)	11.7(15)
	岩相 a ₈	1.16 ~ 4.16	0.04 ~ 0.09	3.86 ~ 8.23	5.4 ~ 8.8	4.9 ~ 7.3	1.1 ~ 2.1	10.1 ~ 11.3
		1.84(71)	0.07(71)	5.27(71)	7.6(19)	5.8(19)	1.7(19)	10.9(19)

注:表中数据为最小值~最大值
平均值(样品数)。

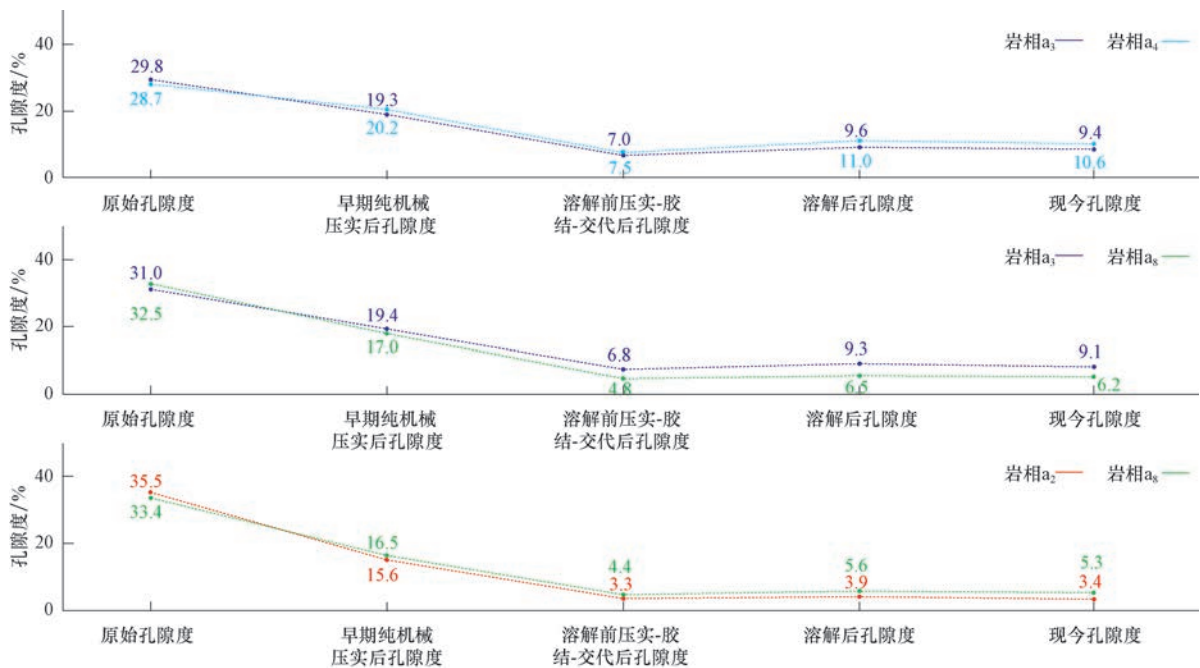


图 8 古龙向斜葡萄花油层典型岩相孔隙度演化历史
Fig. 8 The porosity evolution history of typical lithofacies of Putaohua oil reservoirs in the Gulong syncline
a. 水下河道微相; b. 厚层席状砂微相; c. 薄层席状砂微相

碳酸盐胶结物溶孔对次生孔隙的贡献量差别,对于计算孔隙度值与岩心实测孔隙度值误差大于 2% 的样品需要重新标定,最终计算出不同微相的典型岩相单元孔隙度演化历史,如水下河道微相初始孔隙度临界值为 28.7% 和 29.8%,机械压实后剩余孔隙度临界值为 19.3% 和 20.2%,溶解前胶结后孔隙度临界值为 7.0% 和 7.5%,溶解作用后孔隙度临界值为 9.6% 和 11.0%,再次胶结作用后现今孔隙度临界值为 9.4% 和 11.6%(图 8)。

4.4 油气成藏动态过程

基于岩相组成微相的类型及比例,采用算数平均

值法,计算出古龙向斜葡萄花油层不同微相在各成岩阶段的孔隙度值。葡萄花油层烃类流体包裹体均一温度校正结果显示,储层 3 个成藏期对应温度分别为 60 ~ 70,80 ~ 90 和 110 ~ 120℃,结合埋藏史与热史分析得出对应的成藏时期为:嫩江组沉积末期、明水组沉积末期和依安组沉积末期^[25]。通过对古龙向斜油气滞留区边界录井含油级别统计,油斑砂岩孔隙度临界值平均约为 10.2%,即采用孔隙度 10% 为致密临界值^[17](图 9)。

综上,最终得到向斜区葡萄花油层致密史与成藏史的时空耦合关系:嫩江组沉积末期,水下河道微相和

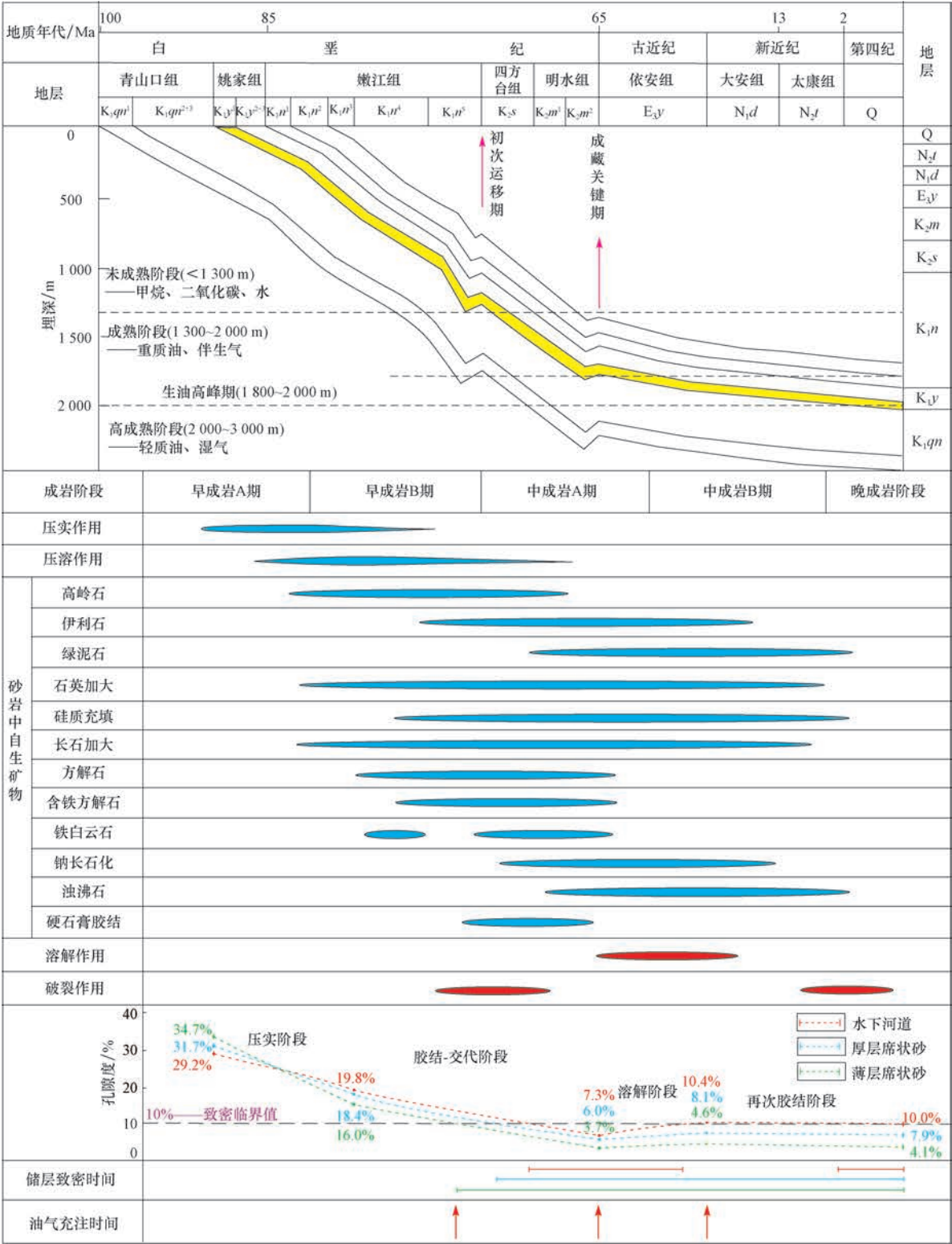


图 9 古龙向斜葡萄花油层致密史与成藏史耦合关系

Fig. 9 The coupling relationship between tightening and hydrocarbon accumulation history of Putaohua oil reservoir in the Gulong syncline

厚层席状砂微相未致密,薄层席状砂微相部分致密,油气优先充注水下河道微相和厚层席状砂微相,然后向附近连通的相对高孔隙度薄层席状砂微相(岩相 a_8)充注;明水组沉积时期,是构造定型和油气成藏的关键

时期,储层已经全部致密,此时研究区周边形成物性封闭边界,需要足够大的源储压差才能发生油气幕式充注;依安组沉积时期,储层部分溶蚀改造,相对高孔隙度的水下河道微相(岩相 a_4)再次成为油气充注的优

质储层,而厚层席状砂和薄层席状砂不再发生油气的二次充注。这种油气多期成藏和选择性充注的动态演化过程导致向斜区葡萄花油层发育含油连片但试油产能差异较大的大面积滞留油气藏,油气优先富集在水下河道微相砂体中,然后依次为厚层席状砂微相以及水下河道微相与厚层席状砂微相附近相连通的薄层席状砂微相(图9)。

5 结论

1) 古龙向斜葡萄花油层储层构型解析和发育特征研究表明:葡萄花油层由岩相、微相和亚相3个等级体系组成,属于典型的孔隙型致密砂岩储层,砂岩类型主要为长石岩屑砂岩,孔隙类型主要为粒间溶蚀扩大孔,不同类型储层构型单元的特征参数差异较大。

2) 古龙向斜葡萄花油层储层成岩演化序列为:机械压实—石英、长石加大,高岭石充填孔隙—方解石胶结、交代—硬石膏胶结、交代—长石、岩屑、方解石溶解—石英二级加大—方解石和硬石膏重结晶—伊利石、绿泥石充填,目前已经处于中成岩阶段A期。

3) 古龙向斜葡萄花油层不同微相砂体的致密史与成藏史时空耦合关系表明:嫩江组沉积末期水下河道微相和厚层席状砂微相未致密,油气优先充注水下河道微相和厚层席状砂微相;明水组沉积末期储层全部致密,需要足够大的源储压差油气才能发生充注;依安组沉积末期水下河道微相溶蚀改造未致密,有利于油气选择性充注。

参 考 文 献

- [1] Shanley K W, Cluff R M, Robinson J W. Factors controlling prolific gas production from low-permeability sandstone reservoirs: Implications for resource assessment, prospect development, and risk analysis [J]. AAPG Bulletin, 2004, 88(8): 1083–1121.
- [2] 邹才能, 张光亚, 陶士振, 等. 全球油气勘探领域地质特征、重大发现及非常规石油地质 [J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(2): 129–145.
Zou Caineng, Zhang Guangya, Tao Shizhen, et al. Geological features, major discoveries and unconventional petroleum geology in the global petroleum exploration [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(2): 129–145.
- [3] Holditch S A. Tight gas sands [J]. Journal of Petroleum Technology, 2006, 58(6): 86–93.
- [4] 赵靖舟, 付金华, 姚泾利, 等. 鄂尔多斯盆地准连续型致密砂岩大气田成藏模式 [J]. 石油学报, 2012, 33(增1): 37–52.
Zhao Jingzhou, Fu Jinhua, Yao Jingli, et al. Quasi-continuous accumulation model of large tight sandstone gas field in Ordos Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(Supple1): 37–52.
- [5] 庞雄奇, 周新源, 董月霞, 等. 含油气盆地致密砂岩类油气藏成因机制与资源潜力 [J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2013, 37(5): 28–37.
Pang Xiongqi, Zhou Xinyuan, Dong Yuexia, et al. Formation mechanism classification of tight sandstone hydrocarbon reservoirs in petroliferous basin and resources appraisal [J]. Journal of China University of Petroleum, 2013, 37(5): 28–37.
- [6] Nelson P H. Pore-throat sizes in sandstones, tight sandstones, and shales [J]. AAPG Bulletin, 2009, 93(3): 329–340.
- [7] 戴金星, 倪云燕, 吴小奇. 中国致密砂岩气及在勘探开发上的重要意义 [J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(3): 257–264.
Dai Jinxing, Ni Yunyan, Wu Xiaoqi. Tight gas in China and its significance in exploration and exploitation [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 257–264.
- [8] 高瑞祺, 蔡希源. 松辽盆地油气田形成条件与分布规律 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 104–180.
Gao Ruiqi, Cai Xiyuan. Petroleum formation and occurrence in the Songliao Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 104–180.
- [9] 黄文彪, 邓守伟, 卢双舫, 等. 松辽盆地南部扶余油层致密储层成岩序列及成藏期次 [J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(3): 508–516.
Huang Wenbiao, Deng Shouwei, Lu Shuangfang, et al. Diagenetic sequence and hydrocarbon accumulation phases of the Fuyu layer tight reservoir in the southern Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(3): 508–516.
- [10] 佟斯琴, 李斌, 罗群, 等. 松辽盆地古龙南凹陷葡萄花油层储层单砂层沉积微相研究及有利砂体预测 [J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(4): 517–525.
Tong Siqin, Li Bin, Luo Qun, et al. Single-sandstone-layer sedimentary microfacies and favorable sandbody prediction of Putaohua reservoir in south Gulong sag, Songliao Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(4): 517–525.
- [11] 雷裕红, 罗晓容, 潘坚, 等. 大庆油田西部地区姚一段油气成藏动力学过程模拟 [J]. 石油学报, 2010, 31(2): 204–210.
Lei Yuhong, Luo Xiaorong, Pan Jian, et al. Simulation on hydrocarbon migration and accumulation dynamics of the first member of Yaojia Formation in the west of Daqing Oilfield [J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(2): 204–210.
- [12] Fic J, Pedersen P K. Reservoir characterization of a “tight” oil reservoir, the middle jurassic upper Shaunavon member in the Whitemud and Eastbrook pools, SW Saskatchewan [J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 44: 41–59.
- [13] Storker T M, Harris N B, Elliott W C, et al. Diagenesis of a tight gas sand reservoir: Upper Cretaceous Mesaverde Group, Piceance Basin, Colorado [J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 40: 48–68.
- [14] 李剑, 姜晓华, 王秀芹, 等. 裂谷盆地致密砂岩气成藏机制与富集规律——以松辽盆地与渤海湾盆地为例 [J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(6): 1005–1018.
Li Jian, Jiang Xiaohua, Wang Xiuqin, et al. Mechanisms for gas accumulation and enrichment in tight sandstone reservoir in rift basins: Cases from the Songliao Basin and the Bohai Bay [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(6): 1005–1018.

- [15] 罗静兰,刘新社,付晓燕,等. 岩石学组成及其成岩演化过程对致密砂岩储集质量与产能的影响:以鄂尔多斯盆地上古生界盒8天然气储层为例[J]. 地球科学—中国地质大学学报,2014,39(5):537-545.
- Luo Jinglan, Liu Xinshe, Fu Xiaoyan, et al. Impact of petrologic components and their diagenetic evolution on tight sandstone reservoir quality and gas yield: A case study from He 8 gas-bearing reservoir of upper paleozoic in northern Ordos Basin[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2014, 39(5): 537-545.
- [16] 刘宗堡,宗寿魁,姜崇,等. 凹陷向斜区油气滞留成因机制及成藏模式——以松辽盆地古龙向斜葡萄花油层为例[J]. 中国矿业大学学报,2015,44(1):128-138.
- Liu Zongbao, Zong Shoukui, Jiang Chong, et al. Hydrocarbon retention mechanism and accumulation model of syncline area in depression: as Putaohua reservoir in Gulong syncline, Songliao Basin[J]. Journal of China University Mining & Technology, 2015, 44(1): 128-138.
- [17] 马中振,戴国威,盛晓峰,等. 松辽盆地北部连续型致密砂岩油藏的认识及其地质意义[J]. 中国矿业大学学报,2013,42(2):221-229.
- Ma Zhongzhen, Dai Guowei, Sheng Xiaofeng, et al. Tight sand oil reservoir of continuous type in northern Songliao Basin and its geological significance[J]. Journal of China University Mining & Technology, 2013, 42(2): 221-229.
- [18] 应凤祥,何东博,龙玉梅,等. 碎屑岩成岩阶段划分(SY/T5477-2003)[S]. 北京:石油工业出版社,2003.
- Ying Fengxiang, He Dongbo, Long Yumei, et al. Division of clastic diagenetic Stage (SY/T5477-2003) [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003.
- [19] 孟元林,胡安文,乔德武,等. 松辽盆地徐家围子断陷深层区域成岩规律和成岩作用对致密储层含气性的控制[J]. 地质学报,2012,86(2):325-334.
- Meng Yuanlin, Hu Anwen, Qiao Dewu, et al. Regional diagenetic law and control of diagenesis over gas-bearing capacity of tight reservoirs in deep Xujiaweizi fault depression, Songliao Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(2): 325-334.
- [20] 操应长,蒯克来,王艳忠,等. 冀中坳陷廊固凹陷河西务构造带古近系沙河街组四段储集层孔隙度演化定量研究[J]. 古地理学报,2013,15(5):593-604.
- Cao Yingchang, Xi Kelai, Wang Yanzhong, et al. Quantitative research on porosity evolution of reservoirs in the member 4 of paleogene Shahejie Formation in Hexiwu structural zone of Langgu sag, Jizhong depression[J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(5): 593-604.
- [21] Beard D C, Weyl P K. Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand[J]. AAPG Bulletin, 1973, 57(2): 349-369.
- [22] Scherer M. Parameters influencing porosity in sandstones: A model for sandstone porosity prediction[J]. AAPG Bulletin, 1987, 71(5): 485-491.
- [23] 王瑞飞,陈明强. 储层沉积-成岩过程中孔隙度参数演化的定量分析:以鄂尔多斯盆地沿25区块、庄40区块为例[J]. 地质学报,2007,81(10):1432-1440.
- Wang Ruifei, Chen Mingqiang. Quantitative analysis of porosity evolution during the reservoir sedimentation diagenesis: Taking the Yan 25 and Zhuang 40 areas in the Ordos Basin as examples[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(10): 1432-1440.
- [24] 李易霖,张云峰,尹淑丽,等. 致密砂岩储集空间多尺度表征——以松辽盆地齐家地区高台子油层为例[J]. 石油与天然气地质,2016,37(6):915-922.
- Li Yilin, Zhang Yunfeng, Yin Shuli, et al. Characterization of the pore space in tight sandstone reservoirs from macroscopic and microscopic perspectives: A case study of Gaotaizi reservoir in Qijia area, the Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(6): 915-922.
- [25] 侯启军,冯子辉,邹玉良. 松辽盆地齐家-古龙凹陷油气成藏期次研究[J]. 石油实验地质,2005,27(4):390-394.
- Hou Qian, Feng Zhihui, Zou Yuliang. Study on the pool forming periods of oil and gas in Qijia-Gulong sag in Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2005, 27(4): 390-394.

(编辑 张亚雄)