

构造活动及层序格架约束下的沉积、成岩作用 对储层质量的影响

——以松辽盆地南部大情字井地区葡萄花油层为例

曹 铮¹, 林承焰^{1,2}, 董春梅^{1,2}, 任丽华^{1,2}, 宋 雷³, 邢新亚¹, 马晓兰⁴

[1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2. 山东省油藏重点实验室, 山东 青岛 266580;
3. 中国石油 吉林油田分公司 勘探开发研究院, 吉林 松原 138000; 4. 中国石化 胜利油田分公司 井下作业公司, 山东 东营 257000]

摘要:利用钻测井、岩心、岩石薄片、电镜扫描和室内分析化验等资料,基于层序地层学理论,展开了对松辽盆地南部(松南)大情字井地区葡萄花油层沉积作用、成岩作用和构造活动对储层质量控制作用的研究。结果表明,葡萄花油层层序格架主要由低位体系域和湖侵体系域组成,低位体系域主干分流河道砂岩和岔道口砂岩的储层质量最好,湖侵体系域水下分流河道次之。层序格架约束下的沉积作用控制不同体系域沉积微相的纵横向展布及砂体发育规模差异。垂向上,低位体系域上部砂岩的发育规模大、连通性好,为相对优质储层的发育层段;平面上,主干分流河道砂岩和岔道口砂岩的储层物性相对较好。成岩压实作用是导致葡萄花油层砂岩低渗透化的直接因素,层序格架控制低位体系域砂岩和湖侵体系域砂岩早期成岩环境的差异,导致湖侵体系域砂岩的碳酸盐胶结相对更强。溶蚀作用的强度主要受控于储层物性好坏、油源断裂展布及距油源断裂距离。研究区葡萄花油层的相对优质储层主要受控于层序格架、沉积作用、成岩作用及构造活动4者的耦合作用,即临近油源断裂或被多条油源断裂夹持的低位体系域中上部主干分流河道是相对优质储层发育的主要部位。

关键词:构造活动;层序地层学;储层;葡萄花油层;大情字井地区;松辽盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Impact of sedimentation and diagenesis upon reservoir quality under constraint of tectonic activities and sequence stratigraphic framework—A case study of Putaohua oil layer in Daqingzijing area of southern Songliao Basin

Cao Zheng¹, Lin Chengyan^{1,2}, Dong Chunmei^{1,2}, Ren Lihua^{1,2}, Song Lei³, Xing Xinya¹, Ma Xiaolan⁴

[1. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China;

2. Key Laboratory of Reservoir Geology, Qingdao, Shandong 266580, China;

3. Research Institute of Exploration and Development of Jilin Oilfield Company, PetroChina, Songyuan, Jilin 138000, China;

4. Downhole Service, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying, Shandong 257000, China]

Abstract: The impact of sedimentation, diagenesis and tectonic activities upon reservoir quality in Putaohua oil layer of Daqingzijing area, southern Songliao Basin, was studied based on sequence stratigraphic theories through analyses of drilling and logging data, core and thin section observation, SEM images as well as lab testing results. The result shows that the sequence stratigraphic framework of Putaohua oil layer is mainly composed of a low stand system tract and a lake transgression tract, with the former containing some high-quality sandstone reservoirs in distributary channels and forks of the main stream and the latter with quality sandstone reservoirs in underwater distributary channels. Sedimentation constrained by the framework was found to control the vertical and horizontal distribution of sedimentary microfacies and the scales of sandbodies in these system tracts. Vertically, sandstone layers at the upper part of the low stand system tract are large in scale and good in connectivity, thus contain relatively high-quality reservoirs; and horizontally, reservoir properties of the main distributary channel sandstone and fork sandstone are better for oil and gas accumulation. Diagenesis and

收稿日期:2017-07-10;修订日期:2018-01-23。

第一作者简介:曹铮(1987—),男,博士研究生,储层地质学及油藏分布。E-mail:caozheng_upc@126.com。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05009-003);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(15CX06012A)。

compaction were suggested to be the direct reason behind the low-permeability of Putaohua oil layer, while the sequence stratigraphic framework, which controlled an early diagenesis environment in both system tracts, was regarded to be a factor that strengthened to some extent the carbonate cementation of sandstone layers in the lake transgression system tract. The range and extent of dissolution there were thought to be determined by the properties of reservoirs, distribution of source rock-rooted faults and distance to these faults. Relatively high-quality reservoirs in the oil layer were controlled jointly by four factors, namely the sequence stratigraphic framework, sedimentation, diagenesis and tectonic activity, i. e. the main distributary channels at the central and upper part of the low stand system tract that were near to the source rock-rooted faults or bounded by the faults served as the major spots for high-quality reservoirs to take shape.

Key words: tectonic activity, sequence stratigraphy, reservoir, Putaohua oil layer, Daqingzijing area, Songliao Basin

评价和预测低渗透、致密砂岩储层质量变化是油田勘探开发所面临的一个关键挑战,并引起了国内外众多学者的关注。以往研究主要考虑沉积作用、成岩作用和构造作用的单一因素对储层质量变化的影响^[1-3],如沉积相主要控制颗粒粒径、分选、砂体几何形态以及砂岩原始孔隙特征,并对早期成岩作用具有重要影响^[4-7];成岩作用主要通过压实、胶结和溶蚀作用影响储层质量^[8-11];构造活动引起盆地内流体的大规模流动和运移,对流经的砂岩储层有明显的影响,如常见的有机酸溶蚀^[12-14]。随着层序地层学理论的提出和发展,逐渐认识到层序对各级基准面旋回下的沉积、成岩以及颗粒组分等具有重要控制作用,具体表现在层序格架通过控制沉积相的空间展布及近地表的成岩环境(如孔隙水化学性质、沉积速率及生物扰动等),进而影响储层质量的变化^[4]。

大情字井地区是松辽盆地南部重要的油气勘探开发区块,葡萄花油层为该区中浅层三大含油层系之一。大情字井地区葡萄花油层发育典型的低渗透薄窄砂体,储层质量非均质性较强,导致平面有利相带展布和油气富集规律认识不清,特别是对引起储层质量差异的成因及控制因素认识模糊。文章以松辽盆地南部大情字井地区葡萄花油层为例,综合运用岩心描述、薄片分析、电镜扫描和 XRD 等技术手段,首先建立多级次的高精度层序地层格架,对各级层序控制下的储层特征和沉积相类型进行分析,进而开展层序格架、沉积作用、成岩作用和构造活动共同约束下的储层质量变化和优质储层分析预测,为研究区及类似区块低渗透、致密油藏的勘探与开发提供指导。

1 地质概况

大情字井地区位于松辽盆地南部中央坳陷区长岭凹陷的腹部,北邻乾安次凹,南接黑帝庙次凹,整体为一向斜构造^[15],构造两翼不对称,东缓西陡,面积约

1 200 km²(图1)。葡萄花油层自沉积至今经历了三次大的构造反转运动,分别发生于嫩江组沉积末期、明水组沉积末期及古近系沉积末期,其中嫩江组沉积末期和明水组沉积末期松辽盆地南部发生强烈的水平挤压构造反转抬升运动,导致研究区沿向斜轴部形成了中央断裂带^[15],断裂带内断层多为北西和北北西走向,呈平行或左行雁列式展布^[16],断层密度平均为1.8条/km²,平面延伸长度1~10 km,断距10~60 m不等,将研究区切割成一系列垒堑相间、断阶连接的小断块(图1)。前人研究表明,研究区葡萄花油层具有双源供烃的特征,即研究区黑157井以南至黑帝庙次凹为上覆嫩江组一段烃源岩供烃^[16-17],黑157井以北至乾安次凹为下伏青一段烃源岩供烃^[18],主要成藏期为明水组沉积末期^[15]。

2 层序格架和沉积相类型

以层序地层学理论为指导,通过对岩心、地震、测井和录井等资料综合研究,建立了大情字井地区姚家组的层序地层格架,其中目的层姚一段(对应葡萄花油层)大致对应三级层序的低位体系域和湖侵体系域^[19],姚二+三段对应高位体系域。葡萄花油层顶部发育一套最大湖泛时期沉积的暗色泥岩夹薄层泥质粉砂岩,测井曲线响应特征为高伽马尖峰和低电阻,全区稳定发育且易于追踪。葡萄花油层底界面为区域平行不整合面,对应地震反射界面 T₁⁺,界面之上主要发育葡萄花油层三角洲前缘亚相席状砂沉积的粉砂岩和泥质粉砂岩,界面之下为青山口组前三三角洲亚相泥岩。初始湖泛面之上常发育河道砂岩,且界面上下均表现为退积型准层序叠置样式(图2)。

以岩心观察描述和测井资料分析为基础,通过开展大情字井地区葡萄花油层的沉积背景、沉积特征和沉积构造研究,明确研究区葡萄花油层主要发育浅水网状河三角洲沉积。葡萄花油层低位体系域由一个退

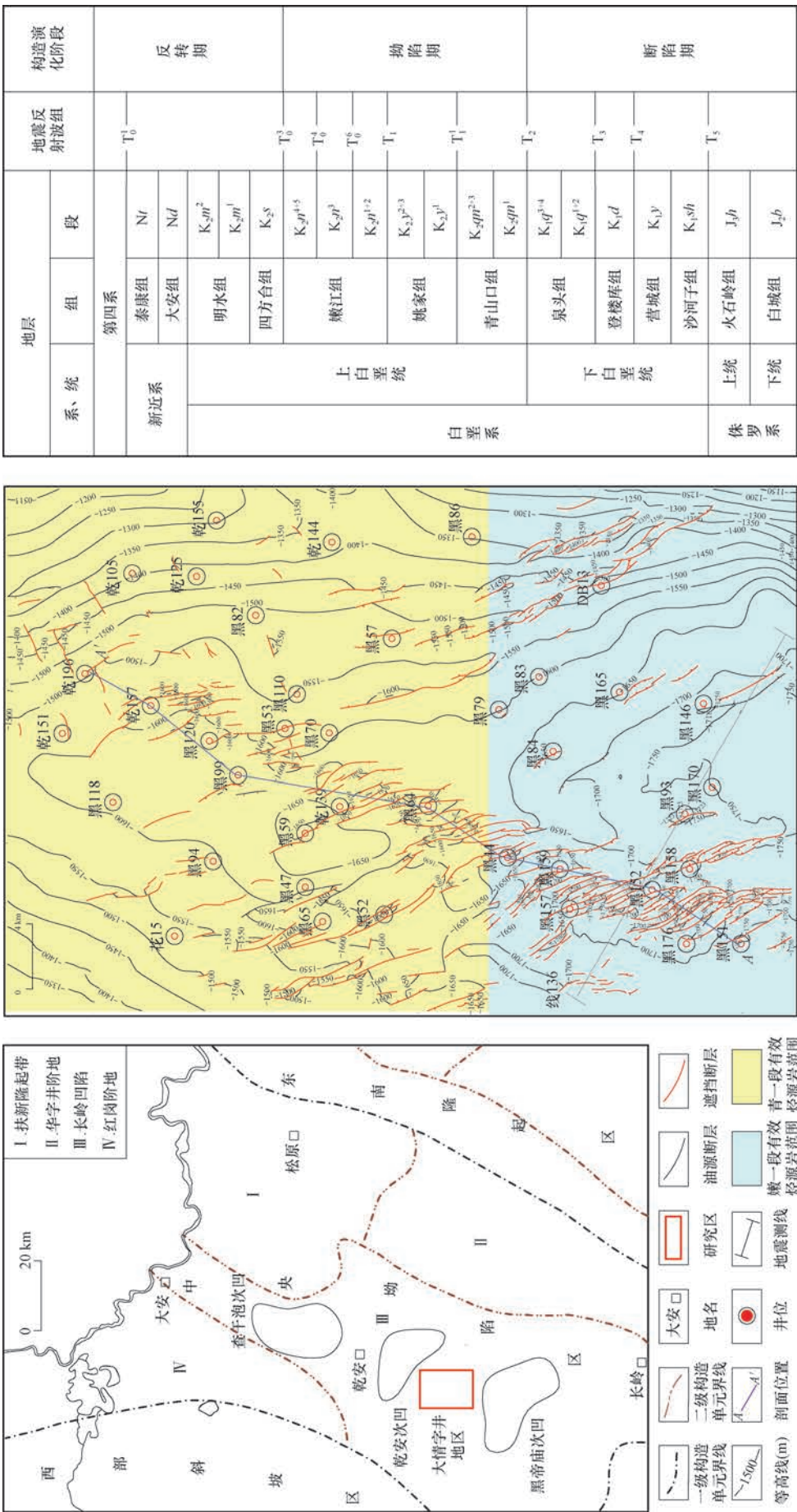


图1 松辽盆地南部大情字井地区构造位置和地层序列示意图[16]
Fig. 1 Sketch map showing the tectonic locations and stratigraphic sequence of Daqingzijing area, southern Songliao Basin[16]

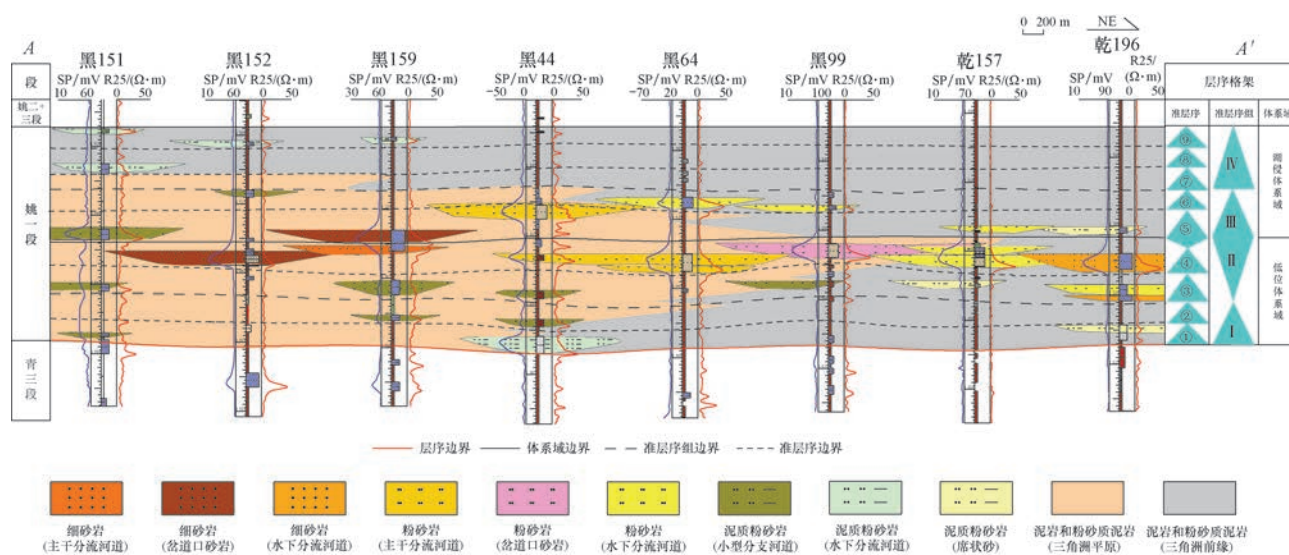


图2 松辽盆地南部大庆子井地区葡萄花油层层序地层格架剖面

Fig. 2 Profile of the sequence stratigraphic framework of Putaohua oil layer in Daqingzijing area, southern Songliao Basin

积型准层序组 (I 号) 和一个进积型准层序组 (II 号) 组成, I 号准层序组主要由两个退积型准层序构成 (1 和 2 号), II 号准层序组可进一步划分为一个退积型准层序 (3 号) 和一个完整的准层序 (4 号)。湖侵体系域主要由两个退积型准层序组构成 (III, IV 号), III 号准层序组由两个退积型准层序 (5 和 6 号) 组成, IV 号准层序组可划分为 3 个退积型准层序 (7, 8, 9 号)。

利用 1 282 口井进行砂体解剖, 结合现代沉积调研, 于三角洲平原网状河道分叉、汇聚的结点处发现一种新型砂体类型: 即岔道口砂岩, 为受单向环流和回流作用共同控制而形成的平面呈近“人”字形的沉积体^[20-21]。根据其发育位置及成因可进一步可分为 3 种亚类: 分流砂型、汇流砂和复合型岔道口砂岩 (图 3)。分流砂形成于河道分叉处, 水流在此处受顶托而变缓, 导致沉积。分流砂头部指向上游, 并不断向上游加积生长, 受沉积时水流冲击强度的影响, 砂体头部粒度相对较粗^[22]; 汇流砂形成于河道汇聚处, 头部指向下游, 并不断向下游方向加积生长, 研究区该类型砂体发育较少, 多被改造为复合型岔道口砂岩; 复合型岔道口砂岩发育在河道分叉交汇的 X 型路口处, 为分流砂和汇流砂相向生长组合形成的“条带状”或“X 型”砂体。

9 个准层序沉积相解剖表明葡萄花油层低位体系域是由三角洲平原主干分流河道 (含岔道口砂岩)、小型分支河道 (含岔道口砂岩) 和决口扇组成, 岩性主要为粉砂岩和泥质粉砂岩 (图 3)。主干分流河道单砂体厚度为 2~5 m, 复合河道砂体厚为 3~10 m (图 2), 沉积构造以块状层理和小型交错层理为主, 可见底部冲刷构造 (图 4a—c)。岔道口单砂体厚度为 2~4 m, 复

合砂体厚为 3~8 m (图 2), 沉积构造主要以小型交错层理为主 (图 4d), 正粒序。小型分支河道主要以泥质粉砂岩为主, 砂体厚度为 2 m 左右。决口扇和天然堤砂体以泥质粉砂岩为主, 砂体厚度在 2 m 以内, 常见小型波状层理及生物潜穴 (图 4e)。湖侵体系域砂岩主要由三角洲前缘水下分流河道砂岩和席状砂组成。水下分流河道砂岩以粉砂岩为主, 少量细砂岩, 可见小型交错层理 (图 4f), 单河道砂体厚度为 2~4 m 不等, 复合河道砂体厚度为 3~5 m。席状砂主要以粉砂岩和泥质粉砂岩为主, 单砂体厚度为 2 m 左右。

3 储层基本特征

3.1 岩石学特征

研究区葡萄花油层储层岩石类型为岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩 (图 5), 碎屑颗粒组分以长石 (平均为 37.7%) 和岩屑 (平均为 34.5%) 为主, 石英 (平均为 28.6%) 含量相对较低。长石类型以钾长石 (平均为 25.1%) 为主, 斜长石 (平均为 12.7%) 次之, 岩屑类型以中酸性火山岩岩屑为主。杂基含量平均为 5.4%; 胶结物总量平均为 8.3%。碳酸盐胶结物含量平均为 3.8%, 主要为铁方解石 (平均为 1.7%; 图 6a) 和铁白云石 (平均为 1.8%; 图 6b)。硅质胶结物主要以次生加大边或粒间孔隙充填的微晶石英形式存在 (图 6b, c), 含量较低 (平均为 1.4%); 粘土矿物含量平均为 3.9%, 其主要类型为伊利石 (平均为 2.3%) 和绿泥石 (平均为 1.3%), 其中伊利石主要呈丝状或片状包裹颗粒边缘或充填粒间孔隙 (图 6d), 高岭石 (平均为

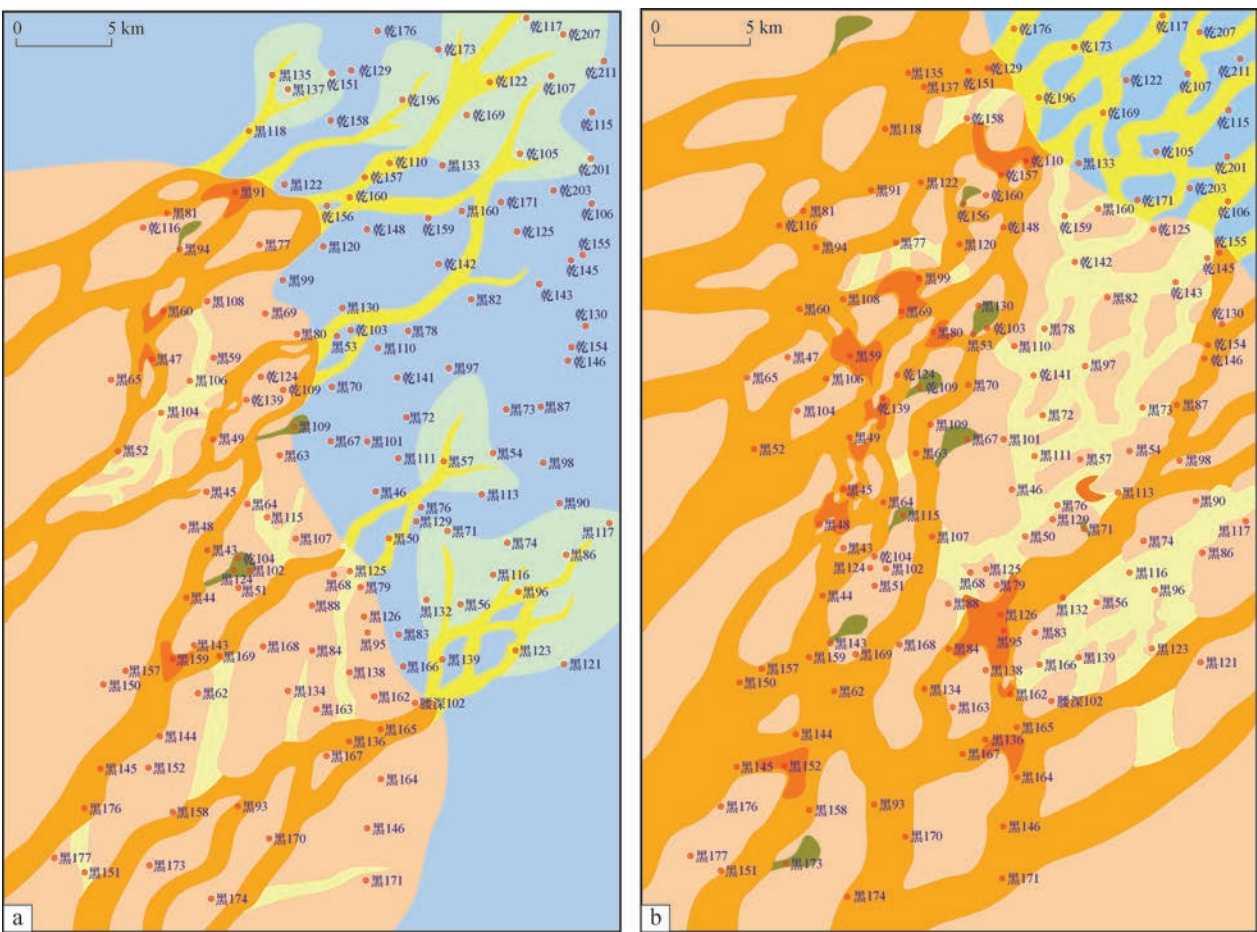


图 3 松辽盆地南部大情字井地区葡萄花油层沉积微相展布

Fig.3 Distribution of sedimentary microfacies in Putaohua oil layer in Daqingzijing area,southern Songliao Basin

a. 5号准层序;b. 4号准层序

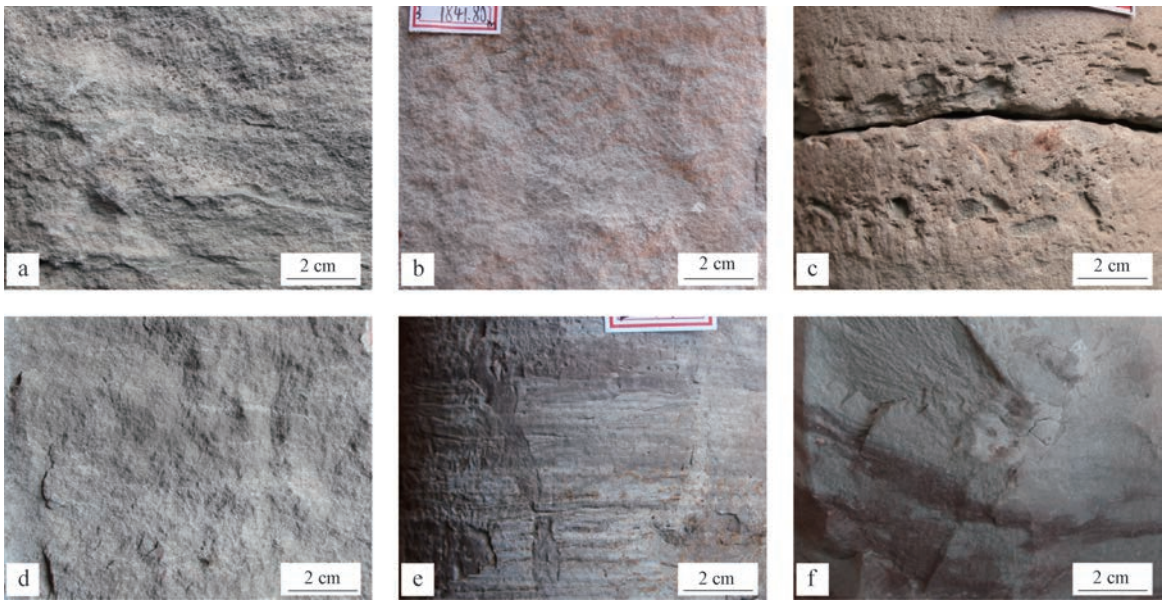


图 4 松辽盆地南部大情字井地区葡萄花油层典型沉积构造现象

Fig.4 Typical sedimentary structures in Putaohua oil layer in Daqingzijing area, southern Songliao Basin

a. 黑157井,埋深1909.7 m,主干分流河道,小型交错层理;b. 乾157井,埋深1841.8 m,主干分流河道,块状层理;c. 黑158井,埋深1951.1 m,主干分流河道,底部冲刷面;d. 黑152井,埋深1934.2 m,主干分流河道岔道口,小型交错层理;e. 黑45井,埋深1876.2 m,决口扇,小型波状层理,生物潜穴;f. 乾160井,1867.5 m,水下分流河道,小型冲刷面

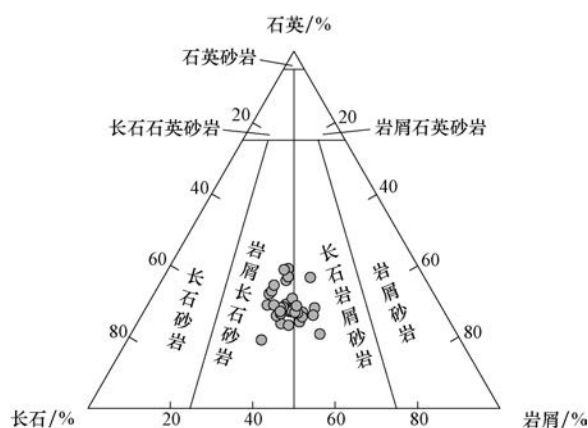


图5 松辽盆地南部大情字井地区葡萄花油层砂岩成分三角图

Fig. 5 Ternary diagram showing sandstone mineralogy in Putaohua oil layer in Daqingzijing area, southern Songliao Basin

0.3%) 和伊蒙混层 (平均为 0.2%) 含量较少; 黄铁矿含量为平均为 0.4% (图 6e)。研究区葡萄花油层砂岩颗粒粒度以粉砂-细粒为主, 分选中等到好, 磨圆以次棱角为主, 成分成熟度低, 结构成熟度中等。

3.2 储集空间类型及物性特征

研究区葡萄花油层的储集空间类型主要为残余原生粒间孔隙 (平均为 0.3%; 图 6f) 和次生溶蚀孔隙 (平均为 2.3%; 图 6g), 个别样品点发育微裂缝 (图 6h)。次生溶蚀孔隙主要类型为粒间溶孔 (多为长石及岩屑颗粒的边缘溶孔和原生粒间孔隙组成的复合孔, 少量碳酸盐胶结物溶孔), 其次为长石和岩屑的粒内溶孔。

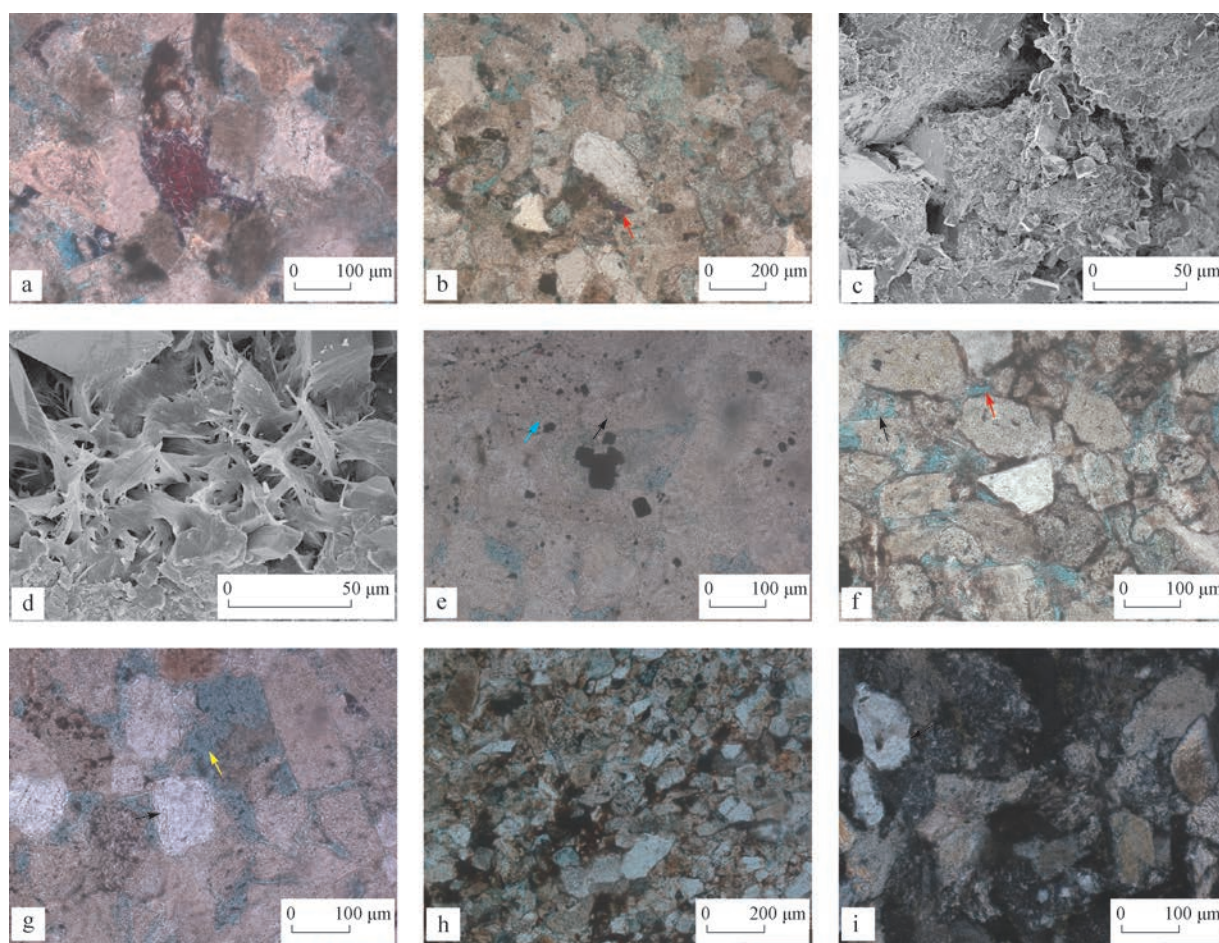


图6 松辽盆地南部大情字井地区葡萄花油层典型成岩作用类型

Fig. 6 Typical diagenetic types of Putaohua oil layer in Daqingzijing area, southern Songliao Basin

a. 黑 158 井, 埋深 1 948 m, 铁方解石不完全交代石英、长石和岩屑颗粒, 染色薄片; b. 乾 157 井, 埋深 1 843.37 m, 石英次生加大 (黑色箭头), 见铁方解石 (红色箭头) 和铁白云石 (蓝色箭头) 胶结, 染色薄片; c. 乾 157 井, 埋深 1 842.68 m, 长石颗粒表面伊利石化, 微晶石英充填粒间孔隙, 扫描电镜; d. 黑 158 井, 埋深 1 948 m, 丝絮状伊利石和微晶石英充填粒间孔隙, 扫描电镜; e. 黑 157 井, 埋深 1 907.61 m, 黄铁矿胶结, 蓝色铸体薄片; f. 乾 155 井, 埋深 1 558.92 m, 石英颗粒表面发育粘土环边, 可见原生粒间孔隙 (红色箭头) 和长石粒内溶蚀孔隙 (黑色箭头), 蓝色铸体薄片; g. 乾 159 井, 埋深 1 826.41 m, 石英次生加大 (黑色箭头), 见铸模孔 (黄色箭头), 粒间溶蚀孔隙发育, 长石、岩屑或填隙物被溶蚀, 蓝色铸体薄片; h. 乾 159 井, 埋深 1 823.56 m, 微裂隙被烃类填充, 铸体薄片; i. 黑 152 井, 埋深 1 934.5 m, 颗粒凹凸接触, 染色薄片

表1 松辽盆地南部大情字井地区葡萄花油层不同体系域及沉积微相储层质量及成岩作用特征

Table 1 Reservoir quality and diagenetic characteristics in different system tracts and sedimentary microfacies of Putaohua oil layer in Daqingzijing area, southern Songliao Basin

体系域	沉积微相	平均孔隙度/ %	平均渗透率/ (10 ⁻³ μm ²)	粒度中值/ mm	平均碳酸盐胶结物 含量/%	平均粘土矿物 含量/%	平均硅质胶结物 含量/%	平均次生溶蚀 面孔率/%
湖侵体系域	水下分流河道	13.8	8.58	0.03	4.6	4.0	1.4	1.8
	席状砂	6.7	3.26					
	主干分流河道	14.7	11.12	0.06	3.6	3.9	1.3	2.4
低位体系域	小型分支河道	5.7	0.98					
	岔道口砂岩	15.0	18.31	0.07	3.3	3.7	1.4	2.6

研究区葡萄花油层孔隙度为2.8%~20.1%,平均为12.8%;渗透率为 $0.03 \times 10^{-3} \sim 103 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $7.65 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为中低孔、低渗-致密储层。低位体系域砂岩孔隙度平均为13.7%,渗透率平均为 $10.07 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;湖侵体系域砂岩的孔隙度平均为10.62%,渗透率平均为 $6.32 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。结合镜下薄片观察分析可知,低位体系域砂岩的原生孔隙度与湖侵体系域砂岩一样(表1),平均为0.3%,次生溶蚀孔隙度(平均为2.5%)比湖侵体系域砂岩高(平均为1.8%)。

4 低渗透储层质量控制因素

4.1 沉积作用对储层质量的控制

研究区葡萄花油层的储层质量差异与层序格架约束下的沉积作用密切相关。对比可知,低位体系域三角洲平原主干分流河道砂岩和岔道口砂岩的平均孔隙度和平均渗透率最高,其次为湖侵体系域水下分流河道砂岩和席状砂,低位体系域小型分支河道的储集物性最差(表1)。试油结果显示,低位体系域主干分流河道砂岩和岔道口砂岩的试油平均产能强度分别为7.1 t/d和16.3 t/d,而湖侵体系域水下分流河道砂岩的试油平均产强度能仅为3.7 t/d。

分析其差异原因,一方面,受可容空间增长速率和沉积速率变化的影响,葡萄花油层砂岩主要集中发育于初始湖泛面上下(准层序3—6,图2)。低位体系域发育早期(准层序1,2),湖盆整体抬升,物源供应不足,沉积速率低,非补偿性的沉积特征突出^[19],该时期研究区主要发育三角洲前缘亚相沉积,砂体发育规模和分布范围均较小,整体呈“泥包砂”特征。低位体系域发育晚期(准层序3,4),可容空间最小,物源供应充足,沉积相带整体向湖推进。该时期研究区主要发育三角洲平原亚相沉积,垂向多为两期河道相互切叠,分

流河道平面呈“结网状”展布(图2)。湖侵体系域发育时期,湖平面快速上升,向上可容空间增大,沉积相带整体向陆后退,研究区以三角洲前缘亚相沉积为主,水下分流河道垂向孤立发育,平面呈“枝状”向湖盆中心推进,河道末端经湖水改造,遭受不同程度的席状砂化(图3)。受相带迁移影响,湖侵体系域分流河道水动力较低位体系域弱,故湖侵体系域砂岩粒度相对低位体系域砂岩更细,导致低位体系域砂岩在压实过程中能够保存更多的原生孔隙,从而具有更高的储层质量(表1)。根据Scherer^[23]建立的原生孔隙度计算公式,恢复葡萄花油层沉积的原生孔隙度,平均为29.8%,由压实作用造成的葡萄花油层的原生孔隙度损失率为40%~80%(图7),其中低位体系域砂岩的压实减孔量平均为11.36%,湖侵体系域砂岩的压实减孔量平均为12.4%(图8)。

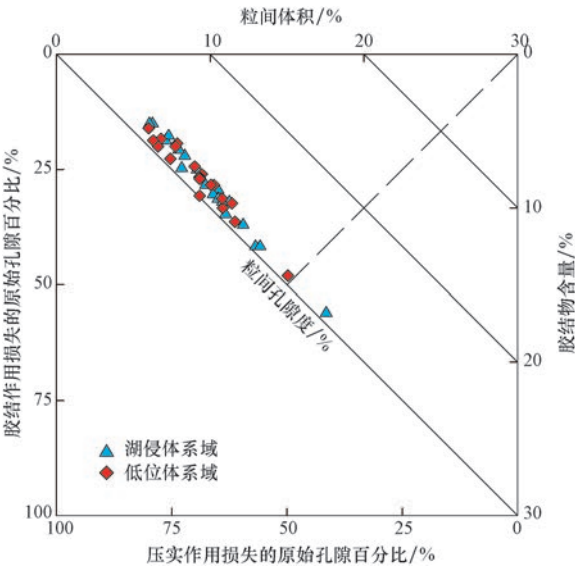


图7 松辽盆地南部大情字井地区葡萄花油层压实作用和胶结作用在孔隙度损失中的相对重要性评价

Fig. 7 Diagram showing the roles of compaction and cementation played in porosity reduction, Putaohua oil layer, Daqingzijing area, southern Songliao Basin

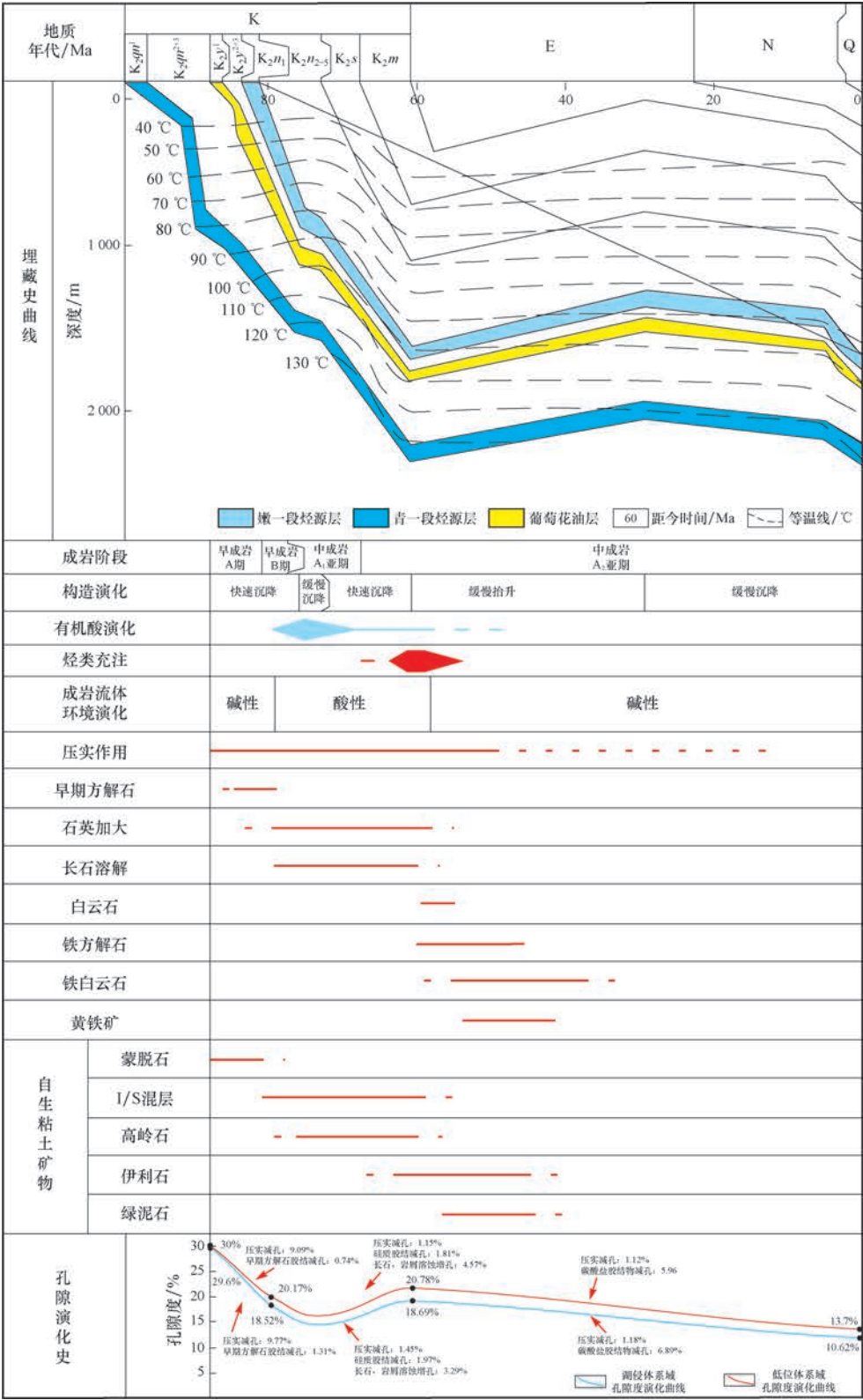


图 8 松辽盆地南部大情字井地区葡萄花油层埋藏史 - 成岩作用序列 - 孔隙度演化史综合图

Fig. 8 Relationship between burial history, diagenesis sequence and evolution of porosity for Putaohua oil layer in Daqingzijing area

K. 白垩系; E. 古近系; N. 新近系; Q. 第四系; K_{2qn}. 青山口组; K_{2y}. 姚家组; K_{2n}. 嫩江组; K_{2s}. 四方台组; K_{2m}. 明水组

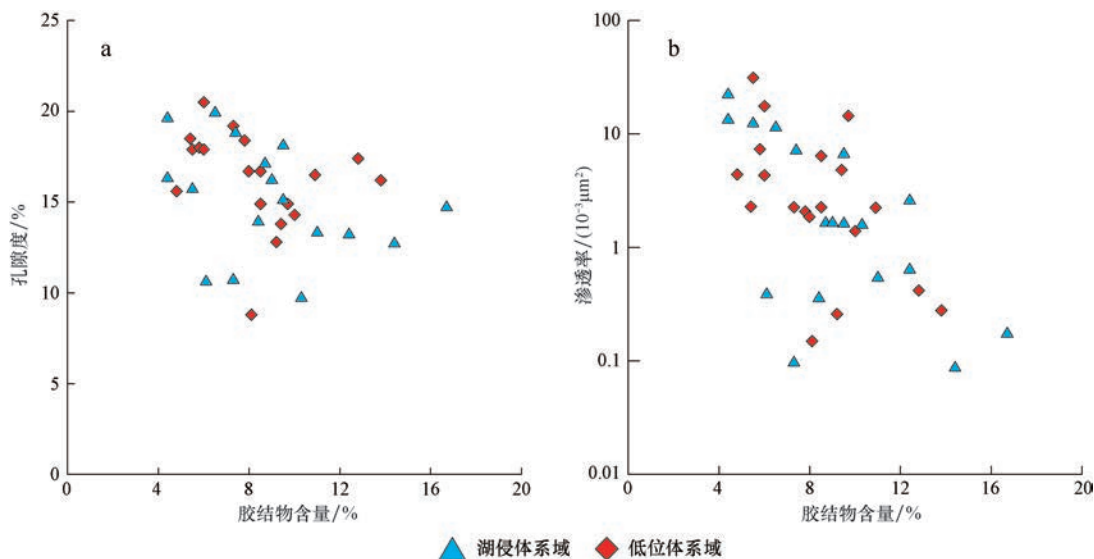


图9 松辽盆地南部大情字井地区葡萄花油层孔隙度、渗透率和胶结物含量关系

Fig. 9 Relationship among porosity, permeability and cement contents in Putaohua oil layer in Daqingzijing area, southern Songliao Basin

4.2 成岩作用对储层质量的控制

层序格架约束下的成岩作用是导致研究区葡萄花油层储层质量差异演化的重要影响因素,笔者通过薄片观察分析,结合埋藏演化史及有机质热演化史分析,建立了大情字井地区葡萄花油层的储层成岩序列。通过分析自生矿物的发育、交代及溶蚀充填关系,明确了葡萄花油层经历了碱性-酸性-碱性的成岩流体环境演化。在此基础上,定量恢复了低位体系域砂岩和湖侵体系域砂岩不同地质历史时期关键成岩作用对储层孔隙度的贡献量演化史^[24-25](图9)。

4.2.1 胶结作用

研究区葡萄花油层胶结物类型以碳酸盐胶结物、粘土矿物和硅质胶结物为主,胶结物含量与储层物性呈反比(图9),由胶结作用导致的葡萄花油层原生孔隙度损失率约为7%~40%(图7),其中低位体系域砂岩的胶结减孔量平均为8.51%,湖侵体系域砂岩的胶结减孔量平均为10.17%(图8)。对比不同体系域砂岩的胶结物含量可知,低位体系域砂岩和湖侵体系域砂岩的粘土矿物和硅质胶结物含量相近,而碳酸盐胶结物含量差异较大(表1)。由此可知,碳酸盐胶结物含量差异对储层质量差异的贡献较大。

葡萄花油层沉积时期,气候干旱,氧化强烈^[19],湖泊水体盐度较高,湖水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 CO_3^{2-} 离子浓度较高,早期碳酸盐胶结物可直接从局部过饱和的碱性湖水介质中析出^[26],湖侵体系域三角洲前缘亚相泥

岩中富含 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 离子,孔隙流体受挤压进入相邻砂岩中,从而导致三角洲前缘水下分流河道砂岩中的早期碳酸盐胶结物含量相对低位体系域三角洲平原砂岩高,可以为溶蚀期后形成的铁方解石和铁白云石提供更多的物质基础。伴随着烃类流体大规模侵入结束,储层成岩环境由酸性逐渐过渡为碱性,烃类将孔隙水中的高价铁离子还原呈二价铁离子^[26],而粘土矿物的大量转化释放了大量 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 。一方面,孔隙水中的 CO_2 与 Ca^{2+} 、 Fe^{2+} 及 Mg^{2+} 结合形成铁方解石和铁白云石;另一方面,早期碳酸盐胶结物与 Fe^{2+} 和 Mg^{2+} 进行离子置换,形成铁方解石和铁白云石,导致湖侵体系域水下分流河道砂岩的碳酸盐胶结物含量比低位体系域分流河道砂岩(含岔道口)的含量高(图7),最终影响湖侵体系域水下分流河道砂岩的储集性能(图10)。

4.2.2 溶蚀作用

大情字井地区葡萄花油层具有双源供烃的特征,烃源岩热演化早期释放大量短链有机酸^[26-27]沿断层运移至葡萄花油层,导致储层砂岩中长石、岩屑颗粒遭受溶蚀,从而形成大量次生溶蚀孔隙。结合镜下薄片观察分析及孔隙度演化表明,研究区葡萄花油层的平均次生溶蚀面孔率为2.3%,对应增加的孔隙度约4.2%,占现今总孔隙度的29%左右。由此可知,溶蚀作用能在很大程度上改善葡萄花油层的储层质量。其中低位体系域砂岩的溶蚀增孔量平均为4.57%,占现今总孔隙度的33.3%左右,湖侵体系域砂岩的平均增

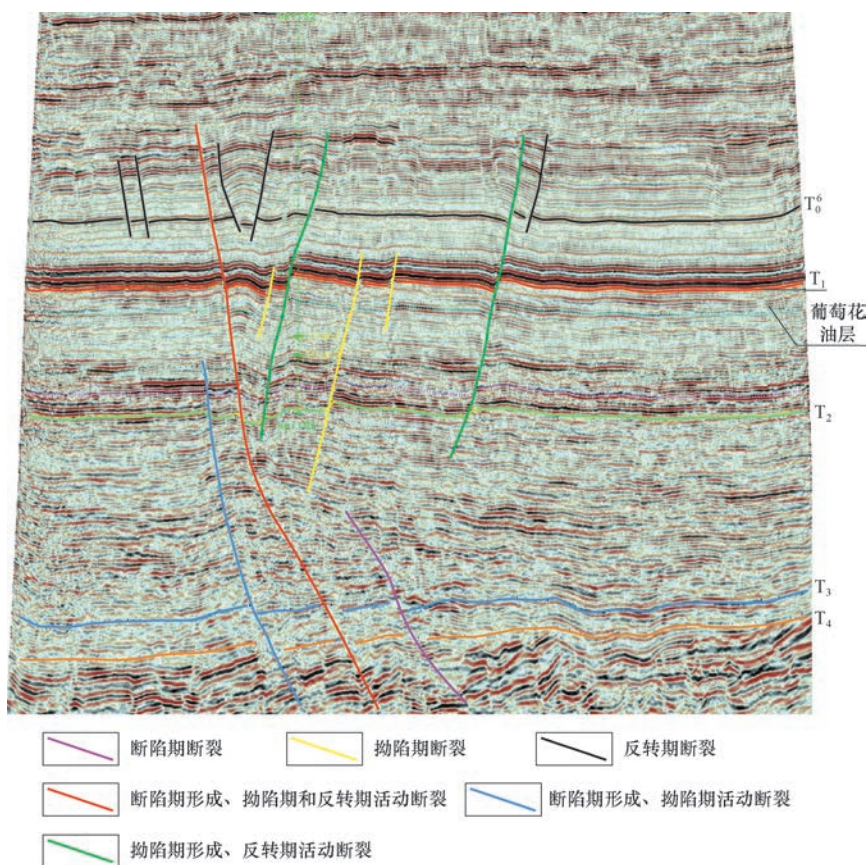


图 10 松辽盆地南部大情字井地区葡萄花油层断层类型^[21]

Fig. 10 Fault types in Putaohua oil layer in Daqingzijing area, southern Songliao Basin^[21]

孔量为 3.29%, 占现今总孔隙度的 30.9% 左右(图 8)。受层序格架约束下的沉积作用的影响,垂向上,葡萄花油层砂岩主要集中发育于初始湖泛面上下(图 2),界面上下的河道砂岩均可作为有机酸流体流动的通道。与湖侵体系域砂岩相比,低位体系域砂岩垂向叠置性好,平面展布范围广(图 2,图 3),导致酸性流体在低位体系域砂岩中的流动性更好,与砂岩中的不稳定硅酸盐矿物(如长石、岩屑)的接触范围更广,反应更彻底,从而导致低位体系域砂岩中的次生溶蚀孔隙的发育程度更高(表 1)。平面上,主干分流河道、分流河道岔道口和下水分流河道部位的溶蚀作用相对决口扇和席状砂部位较强。

4.3 构造活动对储层质量的控制

研究区葡萄花油层储层质量除了受上述因素的影响,还受构造活动的影响。依据断层垂向穿层性将研究区葡萄花油层的断裂可分为四类:1)向下断穿 T_5 和 T_4 反射层,向上断穿至 T_0^6 以上反射层,该类断层形成于断陷期,反转期持续活动,多分布于中央断裂带南北两端,为控制葡萄花油层成藏的油源断裂;2)向下断穿 T_5 和 T_4 反射层,向上断穿 T_2 反射层,终止于青山

口组内部,即断陷期形成拗陷期活动,该类断层一般为第一类断层的伴生断层,非控藏断裂;3)断穿 T_2 和 T_1 ,或仅断穿 T_2 或 T_1 ,即拗陷期内形成并停止活动的断裂,非控藏断裂;4)向下断穿 T_2 或 T_3 ,向上断穿至 T_0^6 以上,即形成于拗陷期,反转期仍持续活动的断裂,该类断裂在研究区发育较多,为控制葡萄花油层成藏的油源断裂(图 10)。由此可知,反转期持续活动的第一类和第四类断层为沟通烃源岩与葡萄花油层的油源断裂,而第二、三类断层则主要起遮挡作用。研究区共发育油源断裂 42 条,平面上沿中央断裂带轴部均匀分布(图 1)。

笔者统计了低位体系域砂岩和湖侵体系域砂岩中同属(水下)分流河道微相的 6 个薄片数据,发现采样点次生溶蚀面孔率与其至油源断层距离及采样点的砂岩的平均粒径有一定相关性,即临近油源断裂的相对粗粒砂岩的次生溶蚀面孔率大。此外,与单一油源断层沟通的砂岩相比,多条油源断层夹持的断阶或断块内的砂岩的次生溶蚀孔隙度更高,储层质量相对更好。如嫩一段烃源岩控制范围内,对比黑 152 井(单一油源断层沟通)和黑 157 井(双油源断层夹持),储层均为低位体系域三角洲平原分流河道岔道口细砂岩沉积,

两者的平均原生粒间孔隙度均为 0.5%, 平均次生溶蚀孔隙度分别为 1.2% 和 2.6%。

5 结论

1) 大情字井地区葡萄花油层砂岩主要沉积于低位体系域三角洲平原环境和湖侵体系域三角洲前缘环境, 砂体成因类型为主干分流河道砂岩、岔道口砂岩、小型分支河道砂岩、水下分流河道砂岩和席状砂。储层岩石类型主要为岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩, 属于中-低孔、低渗-致密砂岩储层, 孔隙类型以次生溶蚀孔隙和残余原生粒间孔为主, 局部地区发育微裂缝。

2) 大情字井地区葡萄花油层低位体系域砂岩的平均孔隙度和平均渗透率比湖侵体系域砂岩的高, 其中低位体系域主干分流河道砂岩和岔道口砂岩的储层质量最好, 湖侵体系域水下分流河道砂岩次之, 低位体系域小型分支河道和湖侵体系域席状砂的储层质量相对最差。

3) 大情字井地区葡萄花油层储层质量主要受层序格架、沉积作用、成岩作用及构造活动等因素共同控制。层序格架约束下的沉积作用控制葡萄花油层不同体系域沉积微相的纵横向展布及砂体发育规模差异, 垂向上, 低位体系域砂岩的发育规模大、连通性好, 为相对优质储层的发育层段, 平面上主干分流河道砂岩和岔道口砂岩的储层物性相对较好; 成岩压实作用是导致研究区葡萄花油层砂岩低渗透化的直接因素, 层序格架控制了低位体系域和湖侵体系域的早期成岩环境的差异, 进而影响了后期碳酸盐胶结作用的强度, 导致湖侵体系域砂岩的碳酸盐胶结相对更强。溶蚀作用的强度主要受控于储层物性好坏、油源断裂展布、及距油源断裂距离。即临近油源断裂或被多条油源断裂夹持的低位体系域中上部主干分流河道是相对优质储层发育的主要部位。

参 考 文 献

- [1] Amel H, Jafarian A, Husinec A, et al. Microfacies, depositional environment and diagenetic evolution controls on the reservoir quality of the Permian Upper Dalan Formation, Kish Gas Field, Zagros Basin [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 67: 57-71.
- [2] Dutton S P, Loucks R G. Diagenetic controls on evolution of porosity and permeability in lower Tertiary Wilcox sandstones from shallow to ultradeep (200~6700m) burial, Gulf of Mexico Basin, USA [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27(1): 69-81.
- [3] Lima R D, De Ros L F. The role of depositional setting and diagenesis on the reservoir quality of Devonian sandstones from the Solimoes Basin, Brazilian Amazonia [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2002, 19(9): 1047-1071.
- [4] MORAD S, AL-RAMADAN K, KETZER J M, et al. The impact of diagenesis on the heterogeneity of sandstone reservoirs: A review of the role of depositional facies and sequence stratigraphy [J]. *AAPG Bulletin*, 2010, 94(8): 1267-1309.
- [5] Amorosi A. Glaucony and sequence stratigraphy: a conceptual framework of distribution in siliciclastic sequences [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1995, 65(4): 493-509.
- [6] Al-Ramadan K, Morad S, Proust J N, et al. Distribution of diagenetic alterations in siliciclastic shoreface deposits within a sequence stratigraphic framework: evidence from the Upper Jurassic, Boulonnais, NW France [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2005, 75(5): 943-959.
- [7] El-ghali M A K, Mansurbeg H, Morad S, et al. Distribution of diagenetic alterations in fluvial and paralic deposits within sequence stratigraphic framework: evidence from the Petrohan Terrigenous Group and the Svidol Formation, Lower Triassic, NW Bulgaria [J]. *Sedimentary Geology*, 2006, 190(1): 299-321.
- [8] El-Ghali M A K, Morad S, Mansurbeg H, et al. Diagenetic alterations related to marine transgression and regression in fluvial and shallow marine sandstones of the Triassic Buntsandstein and Keuper sequence, the Paris Basin, France [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(3): 289-309.
- [9] Ketzer J M, Morad S, Evans R, et al. Distribution of diagenetic alterations in fluvial, deltaic, and shallow marine sandstones within a sequence stratigraphic framework: evidence from the Mullaghmore Formation (Carboniferous), NW Ireland [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2002, 72(6): 760-774.
- [10] Ketzer J M, Morad S. Predictive distribution of shallow marine, low-porosity (pseudomatrix-rich) sandstones in a sequence stratigraphic framework—example from the Ferron sandstone, Upper Cretaceous, USA [J]. *Marine and petroleum geology*, 2006, 23(1): 29-36.
- [11] Lan C, Yang M, Zhang Y. Impact of sequence stratigraphy, depositional facies and diagenesis on reservoir quality: A case study on the Pennsylvanian Taiyuan sandstones, northeastern Ordos Basin, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 69: 216-230.
- [12] 兰朝利, 王建国, 周晓峰, 等. 彭阳油田延长组长 3 段砂岩储层质量控制因素研究 [J]. *岩石学报*, 2014, 21(5): 45-48.
- [13] Lan Chaoli, Wang Jianguo, Zhou Xiaofeng, et al. Impacts on sandstone reservoir quality of the Third Member of Upper Triassic Yanchang Formation, Pengyang oilfield of Ordos Basin, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 21(5): 45-48.
- [14] 李丹, 董春梅, 林承焰, 等. 松南让字井斜坡带源下致密砂岩储集层控制因素 [J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(6): 692-700.
- [15] Li Dan, Dong Chunmei, Lin Chengyan, et al. Control factors on tight sandstone reservoirs below source rocks in the Rangzijing slope zone of southern Songliao Basin, East China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(6): 692-700.
- [16] Khalifa M, Morad S. Impact of structural setting on diagenesis of fluvial and tidal sandstones: the Bahi Formation, Upper Cretaceous, NW Sirt Basin, North Central Libya [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 38(1): 211-231.
- [17] 王永春, 康伟力, 毛超林. 吉林探区油气勘探理论与实践 [M]. 北

- 京:石油工业出版社,2007.
- Wang Yongchun, Kang Weili, Mao Chaolin. The Theory and Practice of Petroleum Exploration in Jilin Exploration Area [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2007.
- [16] 林承焰, 曹铮, 任丽华, 等. 松辽盆地南部大情字井向斜区葡萄花油层油富集规律及成藏模式[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(6): 1-14.
- Lin Chengyan, Cao Zheng, Ren Lihua, et al. Oil Enrichment Regularity and Accumulation Modes of Putaohua Reservoir in Daqingzijing Syncline Area, Southern Songliao Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2016, 46(6): 1-14.
- [17] 葛岩, 黄志龙, 唐振兴, 等. 松辽盆地南部黑帝庙次凹葡萄花油层油源条件及成藏机理[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(3): 25-28.
- Ge Yan, Huang Zhilong, Tang Zhenxing, et al. Study on reservoir-forming mechanism of Putaohua reservoir in Heidimiao secondary depression, Southern Songliao Basin[J]. Oil & Gas Recovery Technology, 2012, 19(3): 25-28.
- [18] 葛岩, 黄志龙, 唐振兴, 等. 长岭凹陷葡萄花油层油源及成藏控制因素分析[J]. 断块油气田, 2013, 20(4): 409-412.
- Ge Yan, Huang Zhilong, Tang Zhenxing, et al. Oil source correlation and controlling factor analysis of hydrocarbon accumulation for Putaohua reservoirs in Changling Sag[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2013, 20(4): 409-412.
- [19] 王立武. 坳陷湖盆浅水三角洲的沉积特征—以松辽盆地南部姚一段为例[J]. 沉积学报, 2012, 30(6): 1053-1059.
- Wang Liwu. Forming conditions and depositional characteristics of shallow-water deltas in depression basins[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(6): 1053-1059.
- [20] 邢新亚, 林承焰, 王东仁, 等. 低渗透油藏网状河道岔道口优质储层特征及其控制因素[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(3): 29-33.
- Xing Xinya, Lin Chengyan, Wang Dongren, et al. Characteristics and controlling factors of favorable reservoirs in braided channel crotch of low permeability reservoir[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(3): 29-33.
- [21] 林承焰, 余成林, 董春梅, 等. 老油田剩余油分布: 水下分流河道岔道剩余油富集[J]. 石油学报, 2011, 32(5): 829-835.
- Lin Chengyan, Yu Chenglin, Dong Chunmei, et al. Remaining oils distribution in old oilfields: enrichment of remaining oils in underwater distributary channel crotches[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(5): 829-835.
- [22] 金振奎, 李燕, 高白水, 等. 现代缓坡三角洲沉积模式: 以鄱阳湖赣江三角洲为例[J]. 沉积学报, 2014, 4(32): 710-723.
- Jin Zhenkui, Li Yan, Gao Baishui, et al. Depositional model of modern gentle slope delta: A case study from Ganjiang Delta in Poyang Lake[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 4(32): 710-723.
- [23] Scherer M. Parameters influencing porosity in sandstones: a model for sandstone porosity prediction[J]. AAPG Bulletin, 1987, 71(5): 485-491.
- [24] 操应长, 惠克来, 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]. JOPC, 2013, 15(5): 593-604.
- [25] 应凤祥, 罗平, 何东博, 等. 中国含油气盆地碎屑岩储集层成岩作用与成岩数值模拟[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 1-141.
- Ying Fengxiang, Luo Ping, He Dongbo, et al. Diagenesis and numerical simulation of clastic reservoir in oil-gas bearing basins, China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 1-141.
- [26] 魏巍, 朱筱敏, 国殿斌, 等. 查干凹陷下白垩统砂岩储层碳酸盐胶结物成岩期次及形成机理[J]. 地球化学, 2015, 44(6): 590-599.
- Wei Wei, Zhu Xiaomin, Guo Dianbin, et al. Carbonate cements in Lower Cretaceous Bayingebi sandstone reservoirs in Chagan Sag, Yine Basin: Formation phases and formation mechanisms[J]. Geo Chemical, 2015, 44(6): 590-599.
- [27] 杨晓萍, 赵文智, 邹才能, 等. 低渗透储层成因机理及优质储层形成与分布[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 57-61.
- Yang Xiaoping, Zhao Wenzhi, Zou Caineng, et al. Origin of low-permeability reservoir and distribution of favorable reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4): 57-61.

(编辑 董立)