

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2021.02.016

碳酸盐质砾岩致密油成藏主控因素研究 ——以束鹿凹陷沙河街组沙三下亚段砾岩储层为例

曹晓峰¹, 陈朝兵², 李静¹, 吕宏玖¹, 张玉川¹, 谢杰¹, 王亮¹,
李云峰¹, 焦立芳¹, 朱玉双^{3,*}

(1. 中国石油天然气股份有限公司华北油田分公司第五采油厂, 河北 辛集 052360;

2. 西安石油大学地球科学与工程学院, 陕西 西安 710065; 3. 西北大学

地质学系大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069)

摘要:通过地震、测井、岩心及分析测试等资料,探讨了碳酸盐质砾岩致密油的成藏特征及主控因素,明确了砾岩致密油的有利勘探方向。结果表明,束鹿凹陷沙三下亚段的砾岩具有陆源和内源混源特征,与砾岩呈互层接触的泥灰岩烃源岩厚度大、分布广、有机质丰度高,为砾岩致密油的成藏提供了物质基础;断层对砾岩致密油成藏的影响有弊有利。优质烃源岩、储层发育程度及有利反向断层圈闭是砾岩致密油成藏的主控因素,成藏模式为“源-储共生”型。建议下一步勘探重点为靠近泥灰岩生烃中心、远离断层发育带并位于坡折带附近的滑塌扇成因砾岩体。

关键词:成藏模式;断层;烃源岩;致密油;碳酸盐质砾岩;束鹿凹陷

中图分类号:TE122.3

文献标志码:A

文章编号:1009-6248(2021)02-0187-16

Study on the Main Controlling Factors of Tight Oil Accumulation in Carbonate Conglomerate ——Taking the Conglomerate Reservoir of the Lower 3rd Member of Shahejie Formation in Shulu Sag as an Example

CAO Xiaofeng¹, CHEN Zhaobing², LI Jing¹, LÜ Hongjiu¹, ZHANG Yuchuan¹,
XIE Jie¹, WANG Liang¹, LI Yunfeng¹, JIAO Lifang¹, ZHU Yushuang^{3,*}

(1. No. 5 Oil Production Plant, Petro China Huabei Oilfield Company, Xinji 052360, Hebei, China;

2. School of Earth Sciences and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, Shaanxi, China;

3. State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China)

Abstract: Based on the seismic data, logging, core analysis and testing, this paper discusses the reservoir forming characteristics, the main controlling factors and favorable exploration direction of the tight oil in carbonate conglomerate. The results show that the conglomerate in the lower 3rd member of Shulu sag has mixed terrigenous and endogenous characteristics. Marl source rocks, interbedded with conglomerate, with large thickness, wide distribution and high organic

收稿日期:2020-03-29;修回日期:2020-10-26

基金项目:中国石油重大科技专项“华北油田持续有效稳产勘探开发关键技术研究与应用”(2017E-15)、国家自然科学基金(41802140)、陕西省自然科学研究基础计划项目(2019JQ-257)、刘宝珺地质科学基金(DMSM2019007)联合资助。

作者简介:曹晓峰(1981-),男,工程师,主要从事油气田开发工作。E-mail: cys-cxf@petrochina.com.cn。

*通讯作者:朱玉双(1968-),女,教授,主要从事油气勘探及开发工作。E-mail:642617295@qq.com。

matter abundance, provide a material basis for the formation of tight conglomerate oil reservoirs. The faults have some effects on the formation of tight conglomerate oil reservoirs. In conclusion, high-quality source rocks, degree of the reservoir development and favorable reverse fault traps are the main controlling factors for tight conglomerate oil accumulation. The accumulation mode is "source-reservoir symbiosis". It is suggested that the future exploration should be near the marlite hydrocarbon-generating center and far from the fault development zone, being in the gravel body of slump fan origin near the slope break zone.

Keywords: accumulation model; fault; source rock; tight oil; carbonate conglomerate; Shulu sag

砾岩通常是近源快速堆积下的产物,碳酸盐质砾岩通常形成于海相沉积环境,其成因及分布受海平面升降变化的控制,多为低位体系域下的沉积产物(邱隆伟等,2006)。碳酸盐质砾岩一般为内源成因,在地震、重力失稳及风暴等外力作用下,台地斜坡带易形成高密度流,经过一定距离搬运堆积于斜坡底部,也可在台地边缘沉积物受外力触发发生原地堆积(崔周旗等,2015)。此外,构造、岩溶及准同生期的干化破裂也可形成碳酸盐质砾岩。陆源碎屑岩成因的碳酸盐质砾岩很少存在,由于碳酸盐的抗风化能力较差,搬运过程中易发生化学溶解,因此国内仅在四川盆地西部及渤海湾盆地冀中凹陷存在(邱隆伟等,2006;韩超等,2015)。冀中凹陷南部的束鹿凹陷沙河街组沙三下亚段广泛发育碳酸盐质砾岩沉积,并在砾岩体中获得了较好的油气显示和勘探潜力,该套砾岩常与泥灰岩互层发育,面积广且厚度大。研究后认为该套含油砾岩为混源碳酸盐质砾岩(吴因业等,2019),既有陆源砾石也有内源砾石,储层相对致密,为碳酸盐质砾岩致密油藏。其储层特征及成藏条件与目前已发现的,如美国 Williston 盆地巴肯油田和鄂尔多斯盆地延长组等非常规致密油藏存在明显差异(付小东等,2019)。

目前,学者对束鹿凹陷沙三下亚段碳酸盐质砾岩的研究已取得了一些有益成果(邱隆伟等,2006;韩超等,2015;赵贤正等,2014;崔周旗等,2015;李庆,2015;赵蕊,2015)。赵贤正等(2014)认为束鹿凹陷碳酸盐质砾岩是一种特殊的致密油气藏,储层整体物性较差,层内非均质性强,地层压力系数高,但投产产量递减快;李庆(2015)认为控制碳酸盐质砾岩储集性能的主要因素是有机质、矿物组分、岩相及裂缝等;邱隆伟等(2006)系统分析了碳酸盐质砾岩的成因及来源,认为束鹿凹陷的碳酸盐质砾岩缺乏黏土组分,应属于非黏性的陆源高密度碎屑流沉

积,而不属于残积或坡积成因;崔周旗等(2015)通过岩石宏观及微观特征分析,提出了适合油田勘探、生产的多维岩性划分方案,将束鹿凹陷沙三下亚段的岩性划分为砂岩、砾岩、泥灰岩和泥岩 4 大类、10 种岩石类型,并认为颗粒支撑的碳酸盐质砾岩是致密油储层的“甜点”区;韩超等(2015)通过微观实验手段对碳酸盐质砾岩储层的孔隙空间及成因进行了研究,认为溶孔、砾内孔及构造缝是砾岩主要的储集空间,裂缝发育区往往是优质储层的有利区。鉴于前人的研究多集中于碳酸盐质砾岩的分类、成因及储层特征上,对于碳酸盐质砾岩的成藏条件及油藏富集规律等方面涉及不多,加之目前深部探井资料的不断补充,有必要深化束鹿凹陷碳酸盐质砾岩致密油的成藏特征及主控因素,摸清砾岩致密油的分布规律,为碳酸盐质砾岩隐蔽油藏的勘探开发提供一定指导。

1 地质概况

束鹿凹陷位于渤海湾盆地冀中坳陷南部(图 1),是一南北向展布、东断西超的单断箕状凹陷,东侧发育新河主断层且与新河凸起紧邻,西侧以斜坡形式过渡到宁晋凸起,北侧发育衡水断层并和深县凹陷连接(梁星如等,2016),面积约 700 km²。东侧新河主断层的雏形形成于燕山期西太平洋板块向华北板块北东向挤压构造运动,即古新河断层。此后,该断层于古近纪基底活动性增强,形成了东侧、南侧及西侧均被古生界碳酸盐岩隆起区所包围,北侧与深县古湖盆相连通的古地貌格局(宋涛等,2013)。古近纪沙三段沉积早期,束鹿凹陷基底遭受不同程度的风化剥蚀作用,地层自西向东由老变新,依次发育中奥陶统、石炭系和二叠系(邱隆伟等,2006)。在此基础上,伴随着构造活动性的不断增强,束鹿凹陷

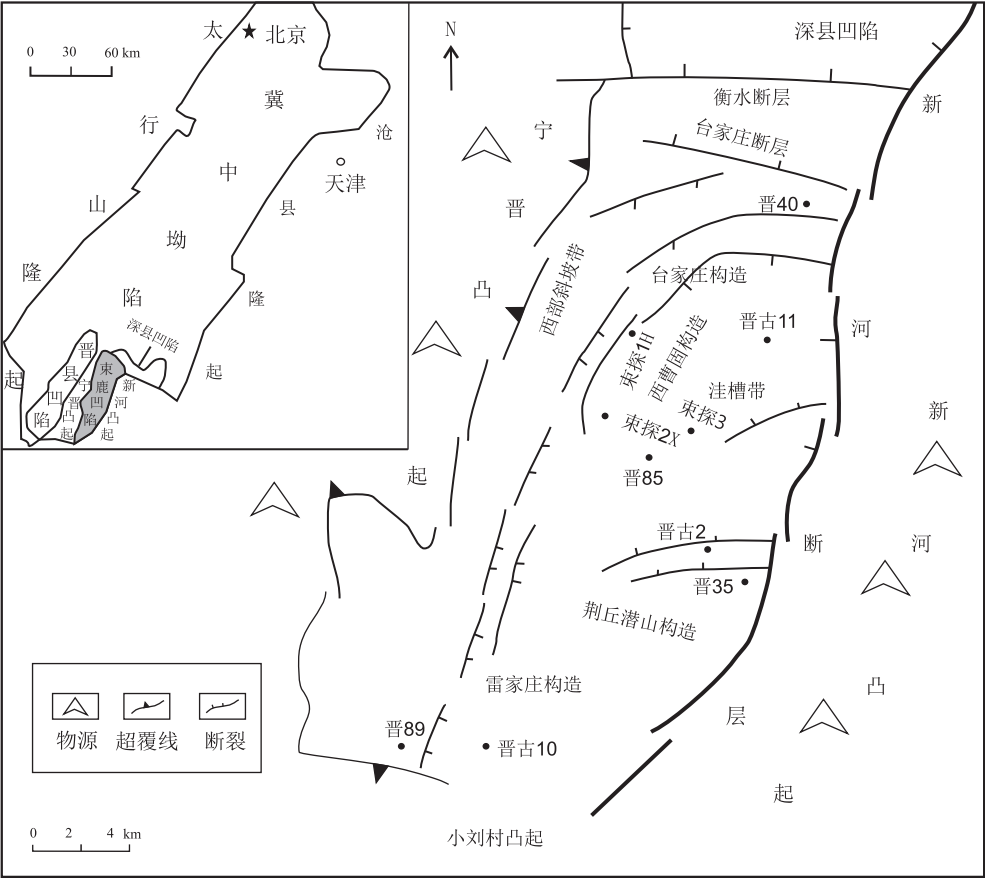


图 1 冀中凹陷南部束鹿凹陷构造简图

Fig.1 Simplified structure of Shulu sag in the south of Jizhong sag

内同沉积断层及后期断层的持续影响,从始新统向上依次沉积了沙河街组、东营组、馆陶组及明化镇组,深凹区地层厚度达 6 500 m 左右,凹陷内的沉积环境以近源碎屑岩及湖相碳酸盐岩沉积为主(赵贤正等,2015)。

沙河街组沙三段早中期为基底断裂扩张活动期,束鹿凹陷内部同沉积断层活动性增强,湖盆快速沉降(邱隆伟等,2006)。此时,束鹿凹陷内部发育荆丘古隆起和台家庄古隆起,将箕状湖盆分隔为南部洼槽、中部洼槽和北部洼槽等 3 个水体不完全畅通的沉积区,其中南部洼槽相对闭塞,水体咸化程度相对较高(李海鹏等,2015)。沙三下早期,凹陷东、南、西 3 个方向的碳酸盐岩隆起区为束鹿凹陷提供了充足的碳酸盐质碎屑砾石,同时受基底古生界碳酸盐岩古隆起原地剥蚀的影响,中部洼槽沉积了厚度较大的碳酸盐质砾岩及泥灰岩等沉积物(赵贤正等,2014),多期砾岩体分布广泛,相互叠置,分布范围超过 200 km²,沙三下亚段地层直接覆于古生界基底

之上,呈东厚西薄特征,地层厚度主体为 500 ~ 1 000 m,东侧深凹区最厚达 1 200 m,其中碳酸盐质砾岩厚度为 3~527 m,平均厚度约为 150 m,同时也沉积了富含有机质的暗色厚层泥灰岩,二者呈互层状分布(付小东等,2019)。沙三下亚段是束鹿凹陷主要的成湖期和优质烃源岩的形成期,在东高西低的构造背景上,形成了东西分带、南北分区的沉积局面(宋涛等,2013)。沙三段晚期—沙一段沉积期,湖盆开始缓慢抬升并逐渐开始咸化,至馆陶组沉积期湖盆逐渐萎缩消亡,进入河流相沉积环境(邱隆伟等,2006)。

2 沉积特征及岩石类型

根据沙三下亚段碳酸盐质砾岩的沉积构造及展布特征,将该砾岩成因划分为 2 类,分别为扇三角洲砾岩和滑塌扇砾岩(图 2、图 3),且具有一定混源特征(邱隆伟等,2006;赵贤正等,2014;李庆,2015)。

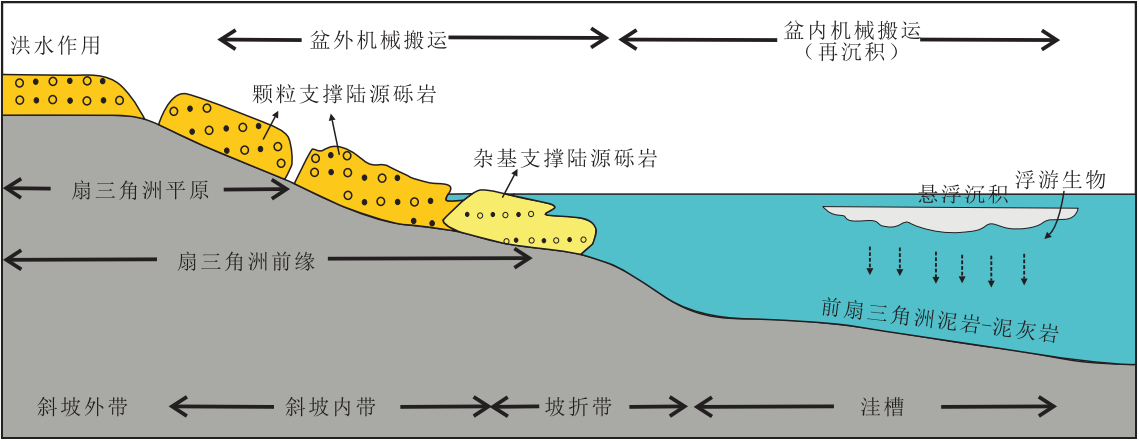


图 2 扇三角洲成因砾岩沉积模式图

Fig. 2 Sedimentary model of conglomerates of fan delta

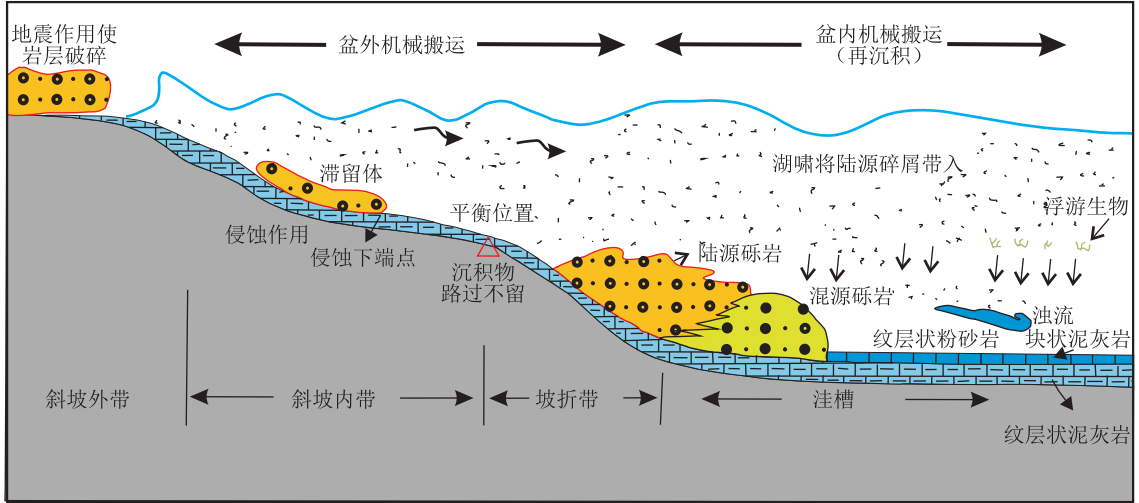


图 3 滑塌扇成因砾岩沉积模式图

Fig. 3 Sedimentary model of conglomerate of slump fan

扇三角洲砾岩距离源区较近,砾石搬运距离较短,磨圆及分选差,砾石与砂泥混杂,成分及结构成熟度低。扇三角洲划分为扇三角洲平原、前缘及前扇三角洲 3 个亚相(图 2)。其中,扇三角洲平原的岩石类型主要为颗粒支撑陆源砾岩(图 4a、图 4b、图 4c),颜色为灰色、灰白色,砾石成分以泥晶灰岩和球粒灰岩为主,粒径最大可达十几厘米,砾石之间充填粉砂级、砂级陆源碳酸盐岩碎屑杂基,常见下粗上细的正粒序。由扇三角洲平原到前扇三角洲,逐渐由陆相向湖相过渡,水动力减弱,大量来自陆源的细粒碎屑杂基成为沉积主体,岩性出现了杂基支撑陆源砾岩(图 4d、图 4e、图 4f),大的陆源砾石呈分散漂浮状分

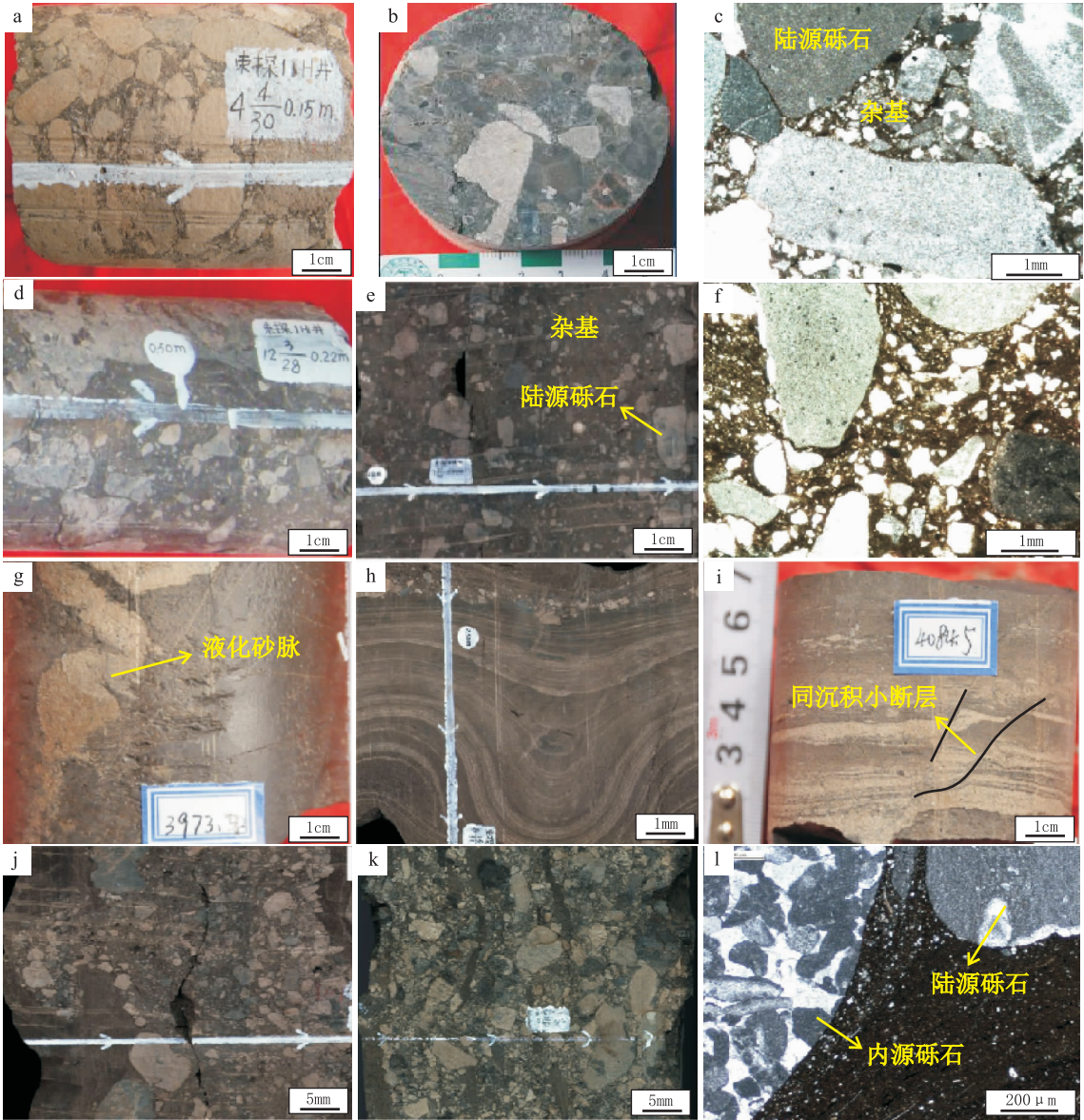
布于暗色杂基中,砾石经历了一定的磨圆和分选,岩石碎屑成分与扇三角洲平原的砾岩成分相近,受同一源区控制。

滑塌扇砾岩是受火山、地震等外部触发因素的影响,碎屑沉积物由凹陷斜坡区或凹陷内的古隆起高部位滑塌形成砾岩体(图 3),类似于浊积岩(崔周旗等,2015;赵蕊,2015),也称“震浊积岩”或“震积岩”,此类砾岩与扇三角洲砾岩的最大区别在于其特有的重力流软沉积变形构造。如液化砂脉(图 4g)、卷曲变形(图 4h)及同沉积小断层(图 4i)等。滑塌扇通常划分为内扇、中扇及外扇。其中,内扇主水道砾岩体厚度大,主要为颗粒支撑陆

源砾岩,因为搬运距离很短,堆积速度快,颗粒磨圆差,分选差,呈棱角状,砾石多见古生界的基底岩石。

中扇水道的岩性出现变化,既有杂基支撑陆源砾岩和颗粒支撑陆源砾岩,也见杂基支撑混源砾岩和颗粒支撑混源砾岩(图4j、图4k、图4l)。

岩的碎屑成分混杂了半固结或固结的湖相泥灰岩砾石,这些泥灰岩砾石是受重力滑塌搅动破碎后的内源砾石。混源砾石中的陆源砾石粒径较小,通常小于2 cm,内源砾石粒径通常较大,为2~13 cm,陆源砾石充填在内源砾石之间,形成陆源砾石与内源砾石共存的特殊岩石类型。



a. 颗粒支撑陆源砾岩岩心,束探1H井,3 969.2 m;b. 砾石的分选磨圆差,晋67井,4 113.6 m;c. 颗粒支撑云岩-灰岩砾岩,束探1H井,3 969.15 m;d. 杂基支撑陆源砾岩岩心,束探1H井,4 082.9 m;e. 陆源砾石漂浮在杂基内,束探1H井,3 988.7 m;f. 杂基支撑云岩-灰岩砾岩,束探1H井,3 974.3 m;g. 液化砂脉构造,束探3井,3 973.7 m;h. 层理发生变形,束探1H井,4 032.5 m;i. 同沉积断层,束探1H井,4 084.5 m;j. 杂基支撑混源砾岩岩心,束探1H井,3 950.3 m;k. 颗粒支撑混源砾岩岩心,束探3井,3 871.1 m;l. 含生物壳体的内源砾石,颗粒支撑,束探3井,3 971.2 m

图4 碳酸盐质砾岩岩石类型图

Fig. 4 Types of carbonate conglomerate rocks

3 成藏主控因素

3.1 优质充足的烃源岩为砾岩致密油提供了物质基础

束鹿凹陷沙三下沉积期,北部洼槽、中部洼槽及南部洼槽水体由淡水向微咸环境过渡,水体深度大、透光性差,湖盆底部水体缺乏喜氧细菌,有机质得以

较好保存;分别在 3 个洼槽内沉积了巨厚湖相泥灰岩(宋涛等,2013;李海鹏等,2015),并与碳酸盐质砾岩呈相间互层接触。泥灰岩厚度为 210~1 510 m,其中厚度大于 200 m 的分布面积约 250 m²(图 5a);中部洼槽沉积的泥灰岩面积和厚度最大,凹陷东部紧邻新河断裂的深凹区泥灰岩沉积厚度普遍大于 800 m,向西部斜坡区泥灰岩厚度逐渐减薄。

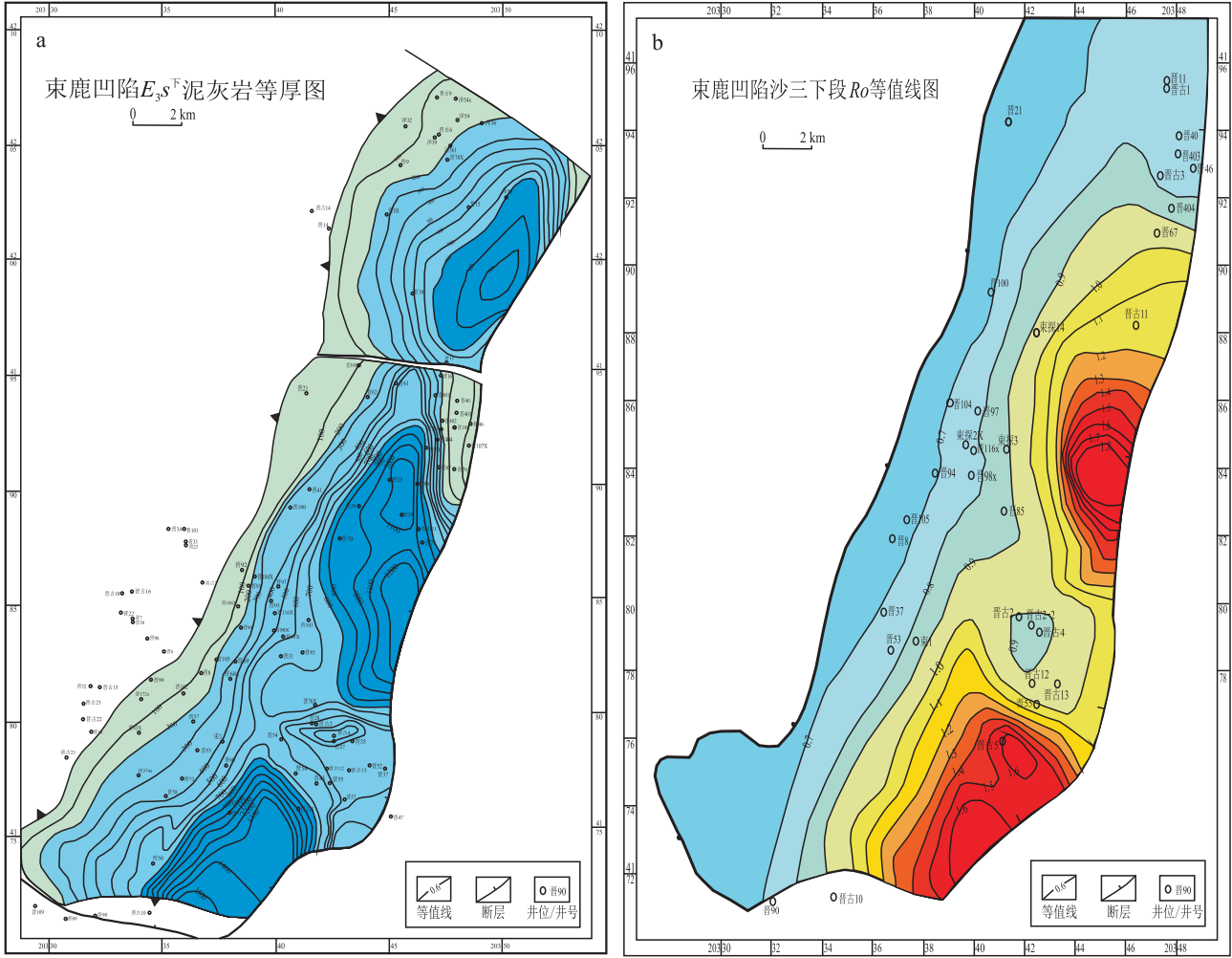


图 5 (a)束鹿凹陷沙三下亚段泥灰岩厚度图(b)束鹿凹陷沙三下亚段泥灰岩 R_o 值平面图

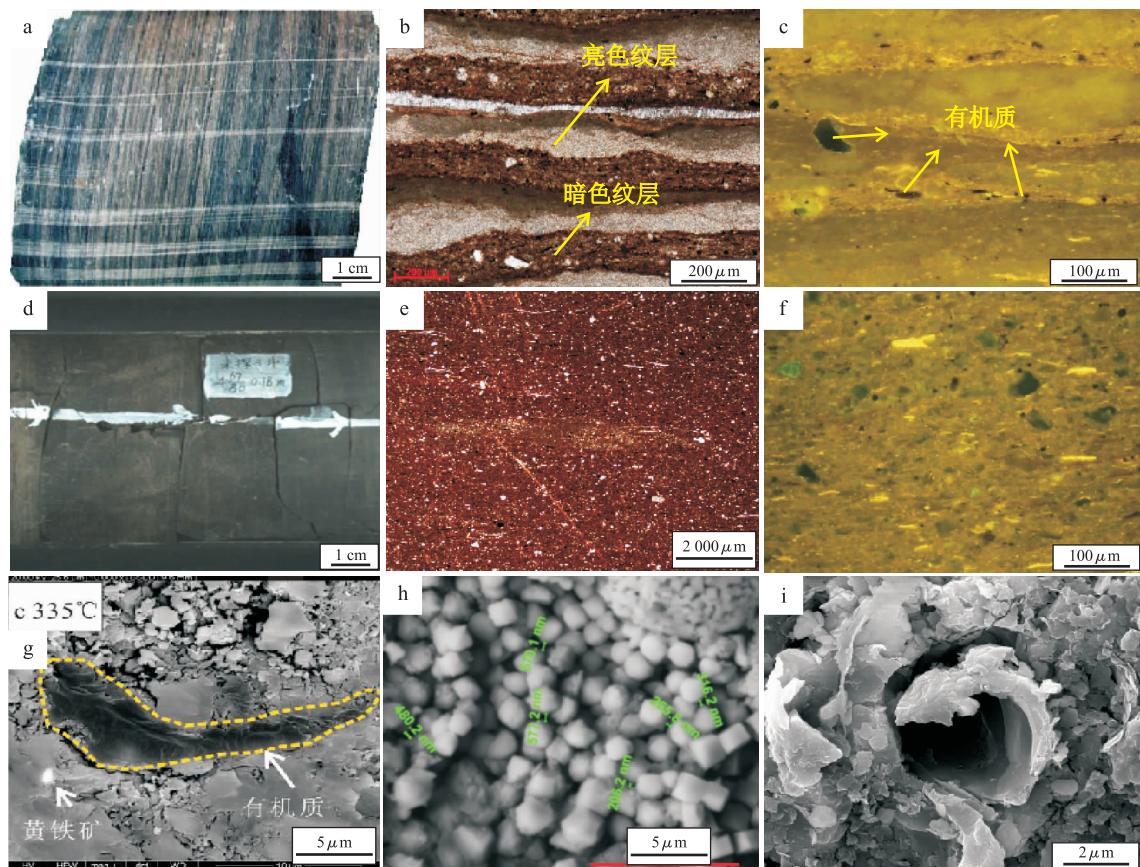
Fig. 5 (a) Plan of marlstone thickness in lower 3rd member of the Shahejie formation of Shulu sag (b) Plan of marlstone R_o in lower 3rd member of the Shahejie formation of Shulu sag

束鹿凹陷沙三下亚段的湖相泥灰岩可划分为块状泥灰岩和纹层状泥灰岩(邱隆伟等,2010;梁宏斌等,2007)。微观显微特征表明纹层状泥灰岩和块状泥灰岩均富含有机质。纹层状泥灰岩呈亮色和暗色纹层相间的沉积韵律层(图 6a),多形成于斜坡带-

半深湖区(曹鉴华等,2014),其中亮色纹层属于湖相化学沉积的泥晶或微晶方解石和白云石(图 6b),暗色纹层主要为陆源沉积的杂基类物质,成分复杂,富含有机质,荧光镜下可见发黄色荧光的条带状有机质聚集体(图 6c);块状泥灰岩整体为灰黑色(图

6d),具有碎屑结构(图6e),成分复杂,以泥级碎屑为主,镜下可见发浅黄色荧光的有机质聚集体(图6f),扫描电镜下有机质呈暗色条带状聚集在泥级碎屑中(图6g),还可见草莓状黄铁矿及其产生的晶间

孔(图6h),偶见生物腔体壳(图6i)等,表明块状泥灰岩多形成于半深湖-深湖还原环境(曹鉴华等,2014),并伴随有间歇性的陆源供给,携带了少量浅水区的生物化石。



a. 纹层状泥灰岩,晋94井,3 426.1 m;b. 暗色纹层富含有机质,束探1H井,4 021.3 m;c. 荧光镜下的条带状有机质,束探3井,4 208.4 m;d. 块状泥灰岩岩心,束探3井,3 877.3 m;e. 块状泥灰岩具碎屑结构,束探3井,3 924.3 m;f. 块状泥灰岩中的有机质,束探3井,3 924.3 m;g. 电镜下的有机质形态,晋100井,3 511.3 m;h. 草莓状黄铁矿及晶间孔,束探3井,3 852.6 m;i. 生物腔体壳特征,束探3井,4 198.3 m

图6 泥灰岩烃源岩镜下显微特征图

Fig. 6 Microscopic characteristics of marl source rocks under microscope

依照陆相烃源岩有机质丰度的评价标准(宋涛等,2013;王嵩等,2017)(SY/T 3735-1995)对沙三下亚段的泥灰岩进行了岩石热解分析(表1),表明泥灰岩烃源岩的有机质丰度高,其中TOC含量为0.16%~4.11%,平均为2.05%;生烃潜量($S_1 + S_2$)为1.02%~30.38%,平均为13.08%;氯仿沥青“A”含量为0.012%~1.065%,平均为0.310%;总碳含量为6.9%~14.3%,平均为10.7%,属于好生油岩。烃源岩热解氢指数 I_H 均大于400mg/g,有机质类型主要为Ⅱ₁型干酪根,生油能力强,富含藻类

体;镜质体反射率 R_o 值主体为0.7%~1.3%,属于低成熟-成熟阶段,其中 R_o 值大于0.9%的分布面积约150 km²(图5b),表明泥灰岩烃源岩目前已处于大面积生油阶段,为碳酸盐质砾岩储层提供了充足的烃类来源(赵贤正等,2015;袁少阳,2016)。

3.2 有效储集空间及物性高值区是油气聚集的基本条件

3.2.1 储集空间特征

与常规碎屑岩致密油储层不同,由于碳酸盐为易溶组分,且碳酸盐质砾岩的砾石和基质均为碳酸

表 1 束鹿凹陷沙三下亚段泥灰岩热解实验数据表

Tab. 1 Marl pyrolysis experimental data table of the lower 3rd member of Shahejie formation in Shulu sag								
井号	井深(m)	层位	岩性	Toc(%)	S ₁ +S ₂ (mg/g)	氯仿沥青“A”(%)	烃源岩氢指数 I _H (mg/g)	总碳(%)
晋 58 井	3 020.8	Es3 下	黑色页岩	3.55	24.95	1.038	577	14.3
晋 58 井	3 030.0	Es3 下	褐色泥页岩	4.11	30.38	1.065	629	11.7
晋 85 井	3 769.5	Es3 下	深灰色泥灰岩	1.47	9.94	0.119	604	10.4
晋 67 井	3 716.5	Es3 下	深灰色含钙泥岩	0.16	1.02	0.012	423	6.9
晋 67 井	3 955.5	Es3 下	深灰色泥灰岩	1.78	9.77	0.121	529	10.8
晋 116x 井	3 684.0	Es3 下	深灰色泥灰岩	1.26	8.16	0.133	586	11.8
晋 116x 井	3 888.0	Es3 下	深灰色泥灰岩	2.17	13.28	0.238	539	11.9
晋 97 井	3 455.5	Es3 下	深灰色泥灰岩	3.17	19.37	0.149	574	10.5
晋 97 井	3 595.1	Es3 下	深灰色泥灰岩	1.41	8.61	0.082	575	11.6
晋 97 井	3 639.0	Es3 下	深灰色泥灰岩	1.36	6.64	0.131	459	9.4
晋 97 井	3 738.5	Es3 下	深灰色泥灰岩	2.12	11.77	0.328	485	8.9
平均				2.05	13.08	0.310	544	10.7

盐,岩石脆性高,因此,形成的储集空间类型也相对复杂(崔周旗等,2015),总体上可以分为孔隙(洞)型和裂缝型 2 大类、6 亚类储集空间类型(表 2)。

孔隙型储集空间可划分为砾内溶孔、粒间孔、溶洞和晶间孔 4 个亚类。粒间孔与常规储层类似,是陆源碎屑颗粒之间的原生孔隙,当基质含量较少或基质发生溶蚀后,形成残余粒间孔(图 7a)或粒间溶孔(图 7b),孔径为 50 nm~150 μm;砾内溶孔多发育在颗粒支撑陆源砾岩及颗粒支撑混源砾岩中(图 7c),砾石的粒径相对较大,砾石内部存在不规则溶

孔,孔径为 1~100 μm;晶间孔在研究区发育程度较高(图 7d、图 7e),此处的晶间孔仅指碳酸盐质砾岩细粒基质中的各类自生矿物晶体间的孔隙,如白云石晶间孔、方解石晶间孔以及黏土矿物晶间孔,孔径相对较小,为 20 nm~40 μm;溶洞为岩心上观察到的溶孔或孔洞(图 7f),通常与生烃期酸性流体的溶蚀作用有关,溶洞内多见油气充注或经过的痕迹,孔径粗大,为 2~6 mm。溶洞虽然孔径大,但其具有很强的非均质性,与裂缝相似,对于油气的运移具有重要作用(李庆等,2015)。

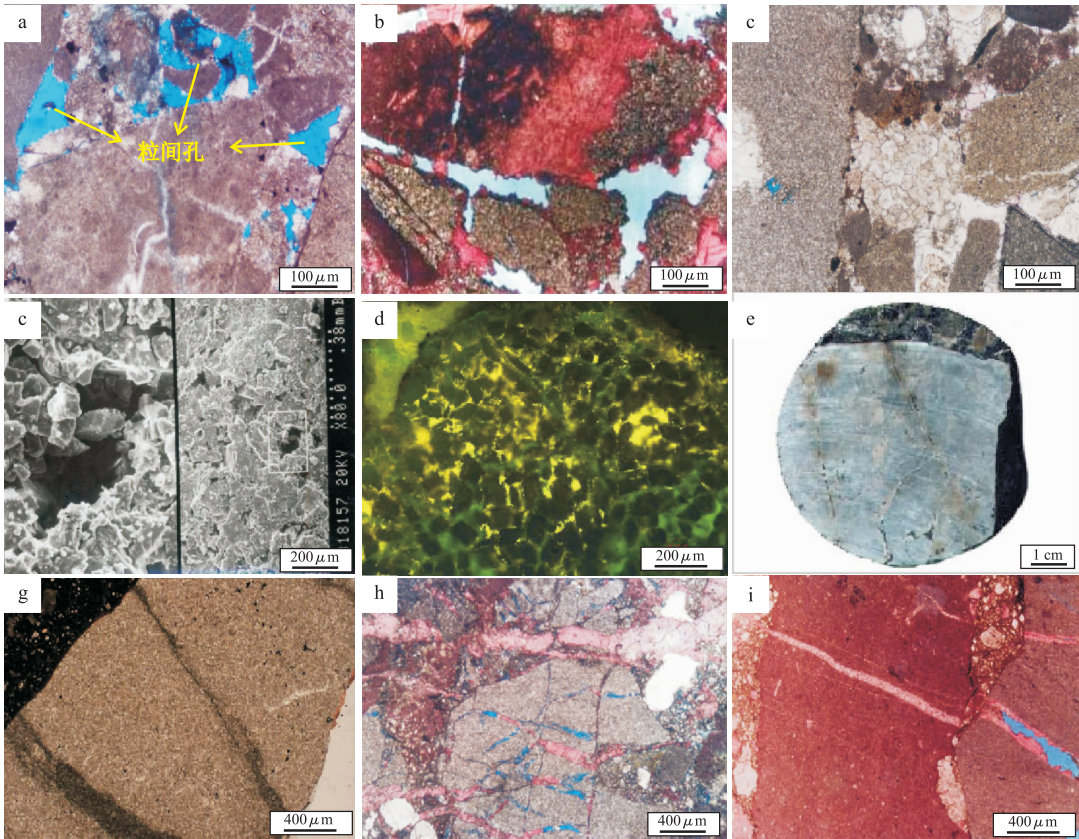
表 2 束鹿凹陷沙三下亚段砾岩储集空间类型及其特征表

Tab. 2 Types and characteristics of conglomerate reservoirs in the lower 3 rd member of Shahejie formation in Shulu sag		
储集空间类型		主要特征
孔隙 (洞)	粒间孔	砾石颗粒间的杂基充填后的剩余孔隙,孔径 50 nm~150 μm
	砾内溶孔	砾石颗粒内部发生选择性溶蚀,孔径 1~100 μm
	晶间孔	方解石等胶结物晶体内的孔隙,孔径 20 nm~40 μm
	溶洞	岩石内部发育的不规则溶洞,孔径 2~6 mm
裂缝	砾内裂缝	原始裂隙或经历压实作用破裂,常被方解石所充填
	构造-溶蚀缝	由构造应力导致,同时切穿砾石和基质的裂缝,呈共轭或斜交,裂缝内部多发生溶蚀,缝宽进一步扩大,孔径 50 μm~2 mm

裂缝型储集空间可划分为砾内裂缝和构造-溶蚀缝 2 个亚类。砾内裂缝是砾石颗粒内部发育的裂隙(图 7g),这些裂隙可以在物源区形成,也可以在搬运过程中形成,或经历成岩压实作用之后破裂形成,大多数被方解石充填;构造-溶蚀缝是在受构造应力作用下破

裂并发生溶蚀的裂缝(图 7h、图 7i),通常较为平直且同时切穿砾石与基质。束鹿凹陷在地质历史上经历了多期构造运动,断裂活动强烈,多期构造应力导致沙三下亚段碳酸盐质砾岩内部发育交错纵横的构造缝(邱隆伟等,2006),呈共轭或斜交状,这些裂缝部分发生溶蚀,

形成构造-溶蚀缝,孔径相对较大,为50 μm~2 mm。
碳酸盐质砾岩虽然储集空间类型多样,但从镜下显微特征及统计结果来看,粒间孔、砾内溶孔和构造-溶蚀缝为最有效的储集空间。



a. 粒间孔,晋 98X 井,4 007.8 m;b. 粒间溶孔,晋 98X 井,4 008.8 m;c. 泥晶灰岩砾石砾内溶孔,晋 404 井,3 725.2 m;
d. 方解石晶间孔,晋 97 井,3 455.4 m;e. 晶间孔,晋 98X,4 006.4 m;f. 岩心溶洞或溶孔,晋 98X 井,4 009.4 m;
g. 砾内裂隙,束探 1 井,4 201.2 m;h. 共轭构造裂缝发生溶蚀,晋 104 井,3 673.4 m;i. 砾石内被方解石充填的裂缝
在成岩期溶蚀,晋 67 井,3 960.3 m

图 7 碳酸盐质砾岩储集空间类型图

Fig. 7 Types of carbonate conglomerate reservoirs

3.2.2 物性特征

束鹿凹陷沙三下亚段碳酸盐质砾岩储层整体致密,储集性能相对较差(赵贤正等,2015;旷红伟等,2008)。对比扇三角洲成因和滑塌扇成因的砾岩物性特征(表 3)发现,滑塌扇成因砾岩的渗透率要略好于扇三角洲成因砾岩,分别为 $1.7\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 和

$1.4\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ 。滑塌扇成因砾岩的孔隙度也高于扇三角洲成因的砾岩,分别为 3.2%和 2.3%。依照石油天然气行业标准,研究区碳酸盐质砾岩储层属于超低孔特低渗储层,为典型的致密储层。因此,在整体致密的背景下,寻找相对高孔高渗发育区是碳酸盐质砾岩勘探和开发的关键。

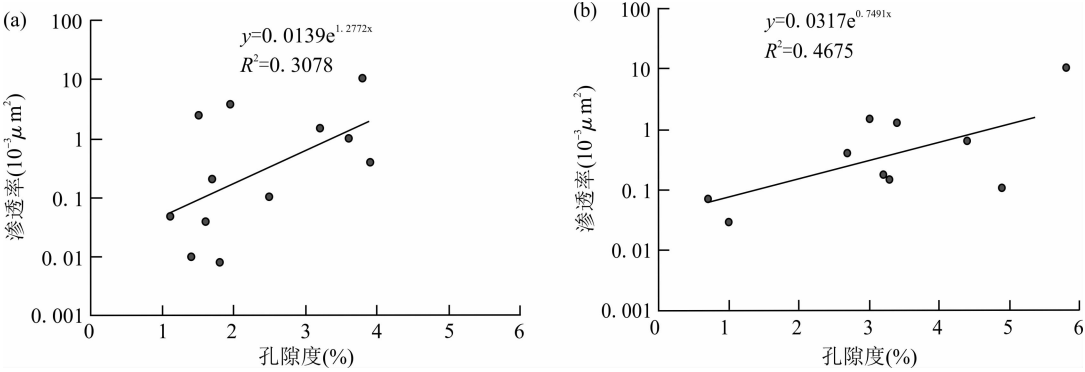
表 3 束鹿凹陷沙三下亚段砾岩储层物性统计表

Tab. 3 Physical properties of conglomerate reservoirs in the lower 3rd member of Shahejie formation in Shulu sag

砾岩成因	孔隙度(%)			渗透率($10^{-3}\mu\text{m}^2$)			样品数(个)
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	
扇三角洲	3.9	1.1	2.3	10.4	0.008	1.4	12
滑塌扇	5.8	0.7	3.2	10.6	0.012	1.7	10

此外,从物性相关性来看,滑塌扇成因砾岩的孔渗相关性也明显好于扇三角洲成因的砾岩,相关性 R^2 分别为 0.467 5 和 0.307 8(图 8)。分析原因有二:①滑塌扇成因的砾岩是受火山、地震等外部因素诱发,通常震级需达到 5 级以上(邱隆伟等,2006),沉积物搬运距离短,沉积速率快,且沉积后乃至成岩后仍不断受到外部触发因素的影响,岩石内部裂缝型储集空间发育程度高,连通性更好。②可能由于

滑塌扇成因砾岩发育在湖盆斜坡带下部,靠近深湖相烃源岩,储层受到生烃期酸性流体的改造强度要大于位于斜坡带上的扇三角洲成因的砾岩,滑塌扇成因的砾岩溶蚀孔发育程度要略高,孔喉连通性更好,这一点从镜下薄片及实测孔隙度的差异也能得到印证。因此,具有更高孔隙度及连通性的滑塌扇成因的砾岩孔渗相关程度更高,是物性高值区的主要发育部位。



a. 扇三角洲成因砾岩孔渗相关性; b. 滑塌扇成因砾岩孔渗相关性

图 8 束鹿凹陷沙三下亚段砾岩物性相关性图

Fig. 8 Correlation of physical properties of different genetic conglomerates in the lower 3rd member of Shahejie formation in Shulu sag

3.3 断层对油藏的改造及控制作用明显

3.3.1 断层发育特征

束鹿凹陷是在新生代构造体系下发育起来的断陷盆地,与冀中凹陷内的其他断陷盆地相比,经历的构造强度相对较低,尤其是在盆地发育过程中并没有经历大规模的断层影响,其断层活动时间与冀中凹陷基本一致(白旭明等,2015),即古近纪发生断陷,新近纪发生拗陷。

古近纪早期,束鹿凹陷断层活动相对简单,以凹陷东侧的新河大断层及伴生的同沉积断层为主,其中新河大断层为北西倾向,北东走向,断距在古近纪达到了数千米,控制了古近纪束鹿凹陷的边界并形成了东断西超的构造格局,新近纪以后新河大断层活动性减弱(苏静等,2008;王少春等,2014)。沙三段发育同沉积断层,但规模不大,主要为顺向正断层,也有部分同沉积顺向断层的发育时间较长,从沙三段至东营组沉积期以后都有活动,平面呈 S 形分布。古近纪后期,束鹿凹陷断层发育程度增强,此时

断层主要为反向断层,呈北东—北北东向分布,断距一般为 50~250 m,多持续至沙一沉积期之前,沙一段以上地层较少见。之后,束鹿凹陷经历构造抬升,进入新近系的盆地凹陷期,此后构造相对稳定(邱隆伟等,2006;白旭明等,2015)。

现今束鹿凹陷基本继承了古近纪晚期的构造样式(图 9),地层剖面自西向东依次可划分为西斜坡外带、西斜坡内带、洼槽带和斜坡陡带 4 个次级单元(赵贤正等,2015)。断层主要发育在西斜坡内带及洼槽内的荆丘古构造带和台家庄古构造带附近(宋涛,2013;赵贤正等,2014)。

3.3.2 断层对砾岩致密油成藏及分布的控制

通过剖面地震资料分析,表明古近纪早期顺向断层为同沉积正断层,导致沙三下亚段地层局部出现错断、重复或加厚等现象,多数断层规模不大,断层上、下盘沙三下亚段地层厚度为 20~180 m,对碳酸盐质砾岩的沉积和展布产生一定影响(王少春,2014;王元元等,2019;刘林等,2018;姚宏鑫等,

2019)。古近纪后期的反向断层对沙三下亚段砾岩致密油的成藏起到明显的控制作用,这种控制作用对于砾岩致密油的影响具有两面性,一方面断层发育区的断层破坏了油藏的保存条件,导致砾岩致密油丰度的降低;另一方面,断层欠发育区的反向断层能够形成良好的断层圈闭,阻断油气向高部位运移和逸散,形成丰度较高的致密油藏。

根据束鹿凹陷北部断层发育区和中部断层欠发育区的沙三下亚段砾岩储层探井试油效果来看(表 4)(图 10a),北部断层发育区探井试油效果整体较差,以含油水层、水层、油水同层和低产油层为主,产

水量大,平均日产油 0.23 t,日产水 17.30 m³,油藏压力系数也明显偏低,平均为 0.85,为低压油藏;此外,断层发育区的晋 94、晋 67、晋 404 等探井岩心裂缝处可见油气逸散后的残余沥青,表明断层破坏了砾岩油藏的保存条件,尤其是接近地表的反向通天断层使油气顺着裂缝向上部逸散,油藏压力下降;束鹿凹陷中部断层欠发育区探井试油效果明显变好,以油层、油水同层及低产油层为主,平均日产油 8.44 t,日产水 4.37 m³,油藏压力系数也较高,平均为 1.11,属于超压油藏,表明断层欠发育区的油藏保存条件好,油气充注程度高。

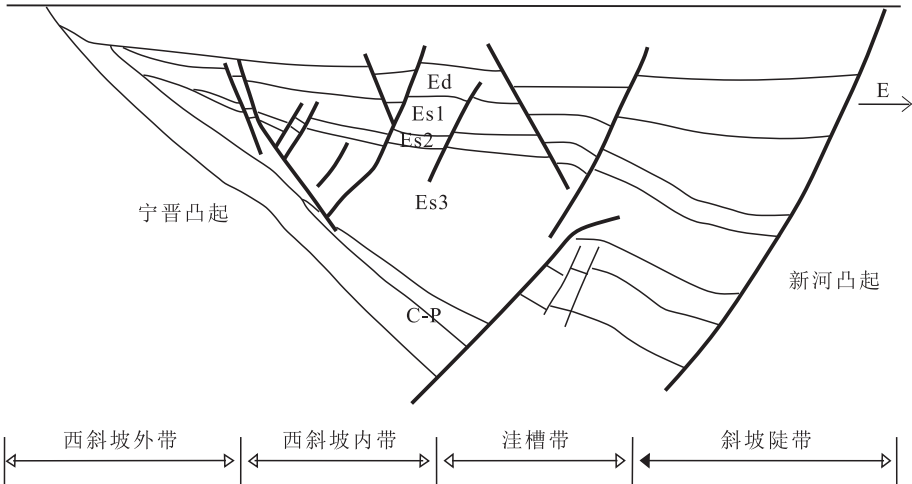


图 9 束鹿凹陷现今断层剖面特征图

Fig. 9 Current fault section characteristics of Shulu sag

从束鹿凹陷东西向油藏剖面来看(图 10b),西部斜坡内带发育的反向断层能够明显控制砾岩致密油的分布,油层在反向断层附近逐渐尖灭,表明反向断层阻断了油气向砾岩体上倾方向的运移,断层封闭性良好,构成具有良好遮挡条件的断层圈闭,这对于碳酸盐质砾岩油藏的成藏和保存具有重要意义。

4 成藏模式

束鹿凹陷沙三下亚段泥灰岩烃源岩与碳酸盐质砾岩呈相间互层沉积,形成“源-储共生”的成藏模式,其中沙三下亚段底部砾岩为“源盖储”成藏,沙三下亚段内部砾岩为“源包储”成藏,优质的烃

源岩为砾岩储层提供了充足的烃类来源;有机质成熟后,在储层整体致密的背景上,烃类优先进入粒间孔、砾内溶孔和构造-溶蚀缝发育的高孔高渗部位,因此储层发育程度是规模成藏的主控因素;砾岩储层在成藏过程中,始终伴随着断层活动,断层在对油藏造成破坏的同时,其较好的封闭性也为油藏的保存起到积极作用,是控制砾岩致密油成藏的关键因素(图 11)。

由于泥灰岩的钙质含量相对较高,有机质成熟释放的酸性流体对烃源岩自身也产生一定溶蚀作用,形成具有一定储集能力的泥灰岩储层,因此与砾岩致密油伴生的还有泥灰岩“源储一体型”油藏(王少春,2014),二者共同构成了沙三下亚段泥灰岩-砾岩致密油的复合成藏模式。

表 4 断层对沙三下亚段砾岩油藏试油效果的影响统计表

Tab. 4 Statistics of the influence of faults on the test results of conglomerate reservoirs in the lower 3 rd member of Shahejie formation							
井号	井段(m)	试油层号	日产油(t)	日产水(m ³)	试油结果	压力系数	构造位置
晋 21	2 579.8~2 586.8	①	0.00	32.80	水层	/	断层发育区
晋 67	4 086.0~4 113.0	①	0.00	0.13	干层	0.71	
	4 016.0~4 027.5	②	0.00	0.00	干层	0.80	
	3 983.0~4 016.0	③	0.21	0.48	油水同层	0.88	
晋 403	3 458.5~3 470.0	①	0.90	0.00	低产油层	/	
		②	0.56	0.57	油水同层		
	3 403.0~3 440.0	③	0.39	31.36	含油水层		
		④	0.62	57.80	含油水层		
晋 404	3 679.1~3 725.3	①	3.37	26.61	油水同层	0.99	
	3 585.4~3 679.1	②	0.76	23.02	含油水层		
平均		/	0.23	17.30	/	0.85	
晋 97	3 838.8~3 886.6	①	2.17	0.00	低产油层	1.33	
		②	1.24	0.00	低产油层		
		③	6.38	1.95	油水同层		
		④	1.50	40.87	油水同层		
	3 623.0~3 747.2	⑤	17.71	16.46	油水同层	0.98	
		⑥	7.08	6.57	油水同层		
		⑦	14.80	3.05	油水同层		
晋 98X	4 070.0~4 092.5	①	19.62	5.81	油水同层	1.28	
	3 959.9~4 070.0	②	21.57	0.00	油层		
		③	13.45	0.00	油层		
晋 116X	4 082.8~4 120.4	①	0.60	0.32	干层	1.03	
		②	13.50	10.19	油水同层		
	3 857.0~3 944.0	③	0.89	0.00	低产油层	1.15	
		④	12.09	4.00	油水同层		
晋古 11	4 266.8~4 374.3	①	1.43	1.21	油水同层	1.39	
		②	6.3	0.00	油层		
		③	0.9	1.00	油水同层		
		④	2.6	0.00	油层		
晋古 13	4 231.6~4 244.6	①	0.15	0.12	油水同层	0.62	
		②	油花	0.15	干层	1.00	
		③	2.24	0.00	低产油层	1.21	
平均		/	8.44	4.37	/	1.11	

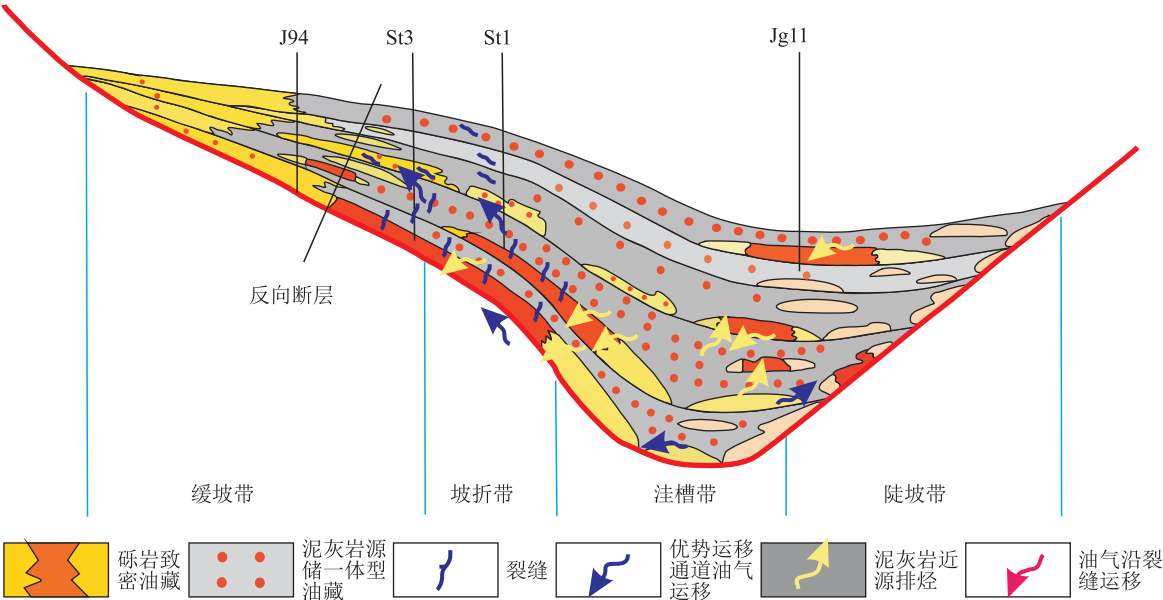


图 11 束鹿凹陷沙三下亚段砾岩致密油成藏模式图

Fig. 11 Conglomerate tight oil accumulation model of the lower 3rd member of Shahejie formation in Shulu sag

5 结论

(1)束鹿凹陷沙三下亚段碳酸盐质砾岩是在古生界基底上发育的内源和陆源砾石混合沉积体,主要来自于滑塌扇和扇三角洲沉积。其中,扇三角洲成因的砾岩以杂基支撑陆源砾岩和颗粒支撑陆源砾岩为主;滑塌扇成因砾岩成分较复杂,混入了湖相内源砾石成分,出现了颗粒支撑混源砾岩和杂基支撑混源砾岩。

(2)碳酸盐质砾岩与泥灰岩烃源岩相间互层沉积。泥灰岩分布广、厚度大、有机质丰度高,属于好生油岩,处于低成熟-成熟阶段,为砾岩致密油的形成提供了物质基础;构造-溶蚀缝、粒间孔和砾内溶孔为砾岩储层主要的储集空间类型;滑塌扇成因的砾岩物性整体好于扇三角洲成因的砾岩,孔渗相关性更高,通常是油气聚集的优势部位;断层一方面破坏了砾岩油藏的保存条件,导致断层发育区油气大量逸散;另一方面,反向断层在砾岩储层上倾方向形成断层圈闭使得油气在相对密闭的系统内大量聚集,是砾岩致密油成藏的关键因素。

(3)综合上述分析,碳酸盐质砾岩致密油的成藏主要受控于烃源岩、优质储层发育程度及断层的控制作用,成藏模式属于“源-储共生”型。建议下一步

勘探重点为靠近泥灰岩生烃中心、远离断层发育带并位于坡折带附近的滑塌扇成因砾岩体。

参考文献(References):

邱隆伟,杜蕊,梁宏斌,等. 束鹿凹陷碳酸盐角砾岩的成因研究[J]. 沉积学报,2006,24(02):202-209.

QIU Longwei, DU Rui, LIANG Hongbin, et al. The Formation of Carbonate Breccia in Shuh Depression [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2006,24(02): 202-209.

崔周旗,郭永军,李毅逵,等. 束鹿凹陷沙河街组三段下亚段泥灰岩-砾岩岩石学特征[J]. 石油学报,2015,36(S1): 21-30.

CUI Zhouqi, GUO Yongjun, LI Yikui, et al. Calcilutite-rudstone petrological characteristics in the lower part of Member 3 of Shahejie Formation, Shulu sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36 (S1): 21-30.

韩超,田建章,赵蕊,等. 束鹿凹陷沙河街组三段下亚段泥灰岩-砾岩致密储层储集空间类型及成因[J]. 石油学报, 2015,36(S1):31-39.

HAN Chao, TIAN Jianzhang, ZHAO Rui, et al. Reservoir space types and its genesis in tight calcilutite-rudstone reservoir of the lower part of Member 3 of Shahejie Formation, Shulu sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36

(S1): 31-39.

吴因业,吕佳蕾,方向,等. 湖相碳酸盐岩—混积岩储层有利相带分析——以柴达木盆地古近系为例[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(08): 1150-1157.

WU Yinye, LÜ Jialei, FANG xiang, et al. Analysis of favorable facies belts in reservoir of lacustrine carbonate rocks-hybrid sediments: Case study of Paleogene in Qaidam Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30 (08): 1150-1157.

付小东,吴健平,寿建峰,等. 渤海湾盆地束鹿凹陷古近系沙河街组湖相混积泥灰岩致密油储层特征[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(01): 78-91.

FU Xiaodong, WU Jianping, SHOU Jianfeng, et al. Tight oil reservoir characteristics of lacustrine mixed marlstone in the Palaeogene Shahejie Formation of Shulu Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2019, 40 (01): 78-91.

赵贤正,朱洁琼,张锐锋,等. 冀中拗陷束鹿凹陷泥灰岩-砾岩致密油气成藏特征与勘探潜力[J]. 石油学报, 2014, 35(04): 613-622.

ZHAO Xianzheng, ZHU Jieqiong, ZHANG Ruifeng, et al. Characteristics and exploration potential of tight calcilutite-rudstone reservoirs in Shulu sag, Jizhong depression, North China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35 (04): 613-622.

李庆. 冀中拗陷束鹿凹陷中南部沙三下亚段砾岩及泥灰岩致密储层评价[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2015.

LI Qing. Evaluation of rudstone and marlstone tight reservoir in Lower part of the Shahejie 3 Formation of the Shulu Sag, Jizhong Depression [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.

赵蕊. 束鹿凹陷中南部沙三下亚段砾岩储层特征研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2015.

ZHAO Rui. Characteristics of Conglomerate Reservoirs in the Lower Part of the 3rd Member of Shahejie Formation in the Middle and Southern Segments of Shulu Sag [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.

梁星如,张峰,李胜利,等. 华北束鹿凹陷斜坡带沙河街组油气藏分布规律与区带成藏模式[J]. 地质力学学报, 2016, 22(01): 66-75.

LIANG Xingru, ZHANG Feng, LI Shengli, et al. Distribu-

tion of Hydrocarbon Reservoirs and Petroleum Accumulation Patterns in Theshahejie Formation on Slope of Shulu depression, North China[J]. Journal of Geomechanics, 2016, 22 (01): 66-75.

宋涛,李建忠,姜晓宇,等. 渤海湾盆地冀中拗陷束鹿凹陷泥灰岩源储一体式致密油成藏特征[J]. 东北石油大学学报, 2013, 37(06): 47-54+8.

SONG Tao, LI Jianzhong, JIANG Xiaoyu, et al. Features of marl tight oil in source rock and reservoir in Shulu Sag of Central Hebei Depression, Bohai Bay basin[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2013, 37 (06): 47-54+8.

邱隆伟,马郡,汪丽芳. 束鹿凹陷古近纪构造活动对沉积作用的影响[J]. 油气地质与采收率, 2006(05): 3-6+103.

QIU Longwei, MA Jun, WANG Lifang. Effect of tectonic movement in Paleogene on sedimentation of Shulu Depression. [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2006 (05): 3-6 + 103.

赵贤正,姜在兴,张锐锋,等. 陆相断陷盆地特殊岩性致密油藏地质特征与勘探实践——以束鹿凹陷沙河街组致密油藏为例[J]. 石油学报, 2015, 36(S1): 1-9+30.

ZHAO Xianzheng, JIANG Zaixing, ZHANG Ruifeng, et al. Geological characteristics and exploration practices of special-lithology tight oil reservoirs in continental rift basins: a case study of tight oil in Shahejie Formation, Shulu sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36 (S1): 1-9 + 30.

李海鹏. 束鹿凹陷古近系沙三下亚段层序地层与致密油藏特征[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2015.

LI Haipeng. Sequence stratigraphy and characteristics of the tight reservoirs in the 3rd Member of the Eocene Shahejie Formation, Shulu Sag [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2015.

王嵩. 华北束鹿凹陷致密油地球化学特征及其成因研究[D]. 杭州:浙江大学, 2017.

WANG Song. Study on geochemical characteristics of tight oil in the Shulu Depression, North China and its genetic type [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.

邱隆伟,姜在兴,梁宏斌,等. 石灰泥岩——一种陆源机械成因的碳酸盐岩[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2010, 34(06): 1-7.

QIU Longwei, JIANG Zaixing, LIANG Hongbin, et al.

- Limemudstone;a kind of carbonate rock of terrigenous mechanical origin[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2010, 34 (06): 1-7.
- 曹鉴华,王四成,赖生华,等. 渤海湾盆地束鹿凹陷中南部沙三下亚段致密泥灰岩储层分布预测[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(04): 480-485.
- CAO Jianhua, WANG Sicheng, LAI Shenghua, et al. Distribution prediction for tight marlstone reservoirs in lower 3rd Member of the Shahejie Formation in central and southern Shulu sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2014, 35 (04): 480-485.
- 袁少阳. 缝-洞型混积碳酸盐岩储层含油性评价技术研究[D]. 武汉:长江大学, 2016.
- YUAN Shaoyang. Research on oil bearing evaluation technology of fractured and caved mixed carbonate reservoir [D]. Wuhan: Yangtze University, 2016.
- 梁宏斌,旷红伟,刘俊奇,等. 冀中坳陷束鹿凹陷古近系沙河街组三段泥灰岩成因探讨[J]. 古地理学报, 2007, 9 (02): 167-174.
- LIANG Hongbin, Kuang Hongwei, LIU Junqi, et al. Discussion on origin formarlis of the Member 3 of Shahejie Formation of Paleogene in Shulu Sag of Central Hebei Depression[J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2007, 9(02): 167-174.
- 旷红伟,刘俊奇,覃汉生,等. 束鹿凹陷古近系沙河街组第三段下部储层物性及其影响因素[J]. 沉积与特提斯地质, 2008, 28(01): 88-95.
- KUANG Hongwei, LIU Junqi, QIN Hansheng, et al. Physical properties and influencing factors of the reservoir rocks in the lower part of the third member of the Palaeogene Shahejie Formation in the Shulu depression [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2008, 28(01): 88-95.
- 白旭明,张以明,杜启振,等. 黏弹性裂缝诱导各向异性介质地震波场传播特征——以束鹿凹陷沙河街组三段下亚段泥灰岩储层为例[J]. 石油学报, 2015, 36(S1): 50-58.
- BAI Xuming, ZHANG Yiming, DU Qizhen, et al. Seismic wave field propagation characteristics of viscoelastic fracture-induced anisotropic medium;a case study of calcilutite reservoirs in the lower part of Member 3 of Shahejie Formation, Shulu sag [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36 (S1): 50-58.
- 苏静,旷红伟,刘俊奇,等. 束鹿凹陷古近系沙三下段沉积相特征研究[J]. 沉积与特提斯地质, 2008, 28(01): 39-47.
- SU Jing, KUANG Hongwei, LIU Junqi, et al. Sedimentary facies in the lower part of the third member of the Palaeogene Shahejie Formation in the Shulu depression, Hebei[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2008, 28(01): 39-47.
- 王少春. 束鹿凹陷湖相泥灰岩油气藏的形成与分布研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京), 2014.
- WANG Shaochun. Lacustrine Marl Reservoir Formation and Distribution of Shulu Sag[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2014.
- 王元元,冯世荣,贾为卫,等. 西天山温泉北中新统塔西河组下部砾岩特征及意义[J]. 西北地质, 2019, 52(03): 26-34.
- WANG Yuanyuan, FENG Shirong, JIA Weiwei, et al. Characteristics and Significance of Gravels from Miocene Taxihe Formation in Northern Wenquan County of West Tianshan, Xinjiang [J]. Northwestern Geology, 2019, 52 (03): 26-34.
- 刘林,芮会超,杨莉. 渭河单冲压陷盆地的厘定及其控藏作用[J]. 西北地质, 2018, 51(02): 186-202.
- LIU Lin, RUI Huichao, YANG Li. Definition of the Weihe Single-thrusting Compressional Basin and Its Reservoir-forming Conditions [J]. Northwestern Geology, 2018, 51 (02): 186-202.
- 姚宏鑫,王宗秀,朱随洲,等. 柴达木盆地北缘侏罗系沉积层序的构造演化响应[J]. 西北地质, 2017, 50(02): 16-27.
- YAO Hongxin, WANG Zongxiu, ZHU Suizhou, et al. The Jurassic Fossil-rich Clastic Sequence and Structural Response in North of Qaidam Basin [J]. Northwestern Geology, 2017, 50 (02): 16-27.