

doi:10.3799/dqkx.2017.145

湖相致密白云岩不均一油藏特征及主控因素

姚悦^{1,2}, 王刚³, 李乐², 刘永河⁴

1. 莱斯大学地质系, 美国休斯顿 TX77005
2. 中国地质大学构造与油气教育部重点实验室, 湖北武汉 430074
3. 新疆煤田地质局, 新疆乌鲁木齐 830091
4. 中国石油大港油田公司第四采油厂, 天津大港 300280

摘要:渤海湾盆地塘沽地区沙三⁵亚段发育湖相含油泥质白云岩层系, 油藏顶面埋深 2 800~3 600 m, 属于中深—深层的断块—岩性油藏, 储层为致密裂缝白云岩。本文通过岩心观察、实验室分析、压力测试、裂缝分析等手段, 重点研究了致密白云岩储层岩石相、储集性、复杂含油性和油藏不均一性特征, 分析了成藏主控因素及成藏模式。研究表明: 储层岩性以白云岩、泥质白云岩为主, 为中—低孔、低渗—特低渗的裂缝—孔隙型储层, 储集空间主要为晶间孔、溶孔、裂缝及溶缝; 超压与含油性密切相关, 超压断块井均中高产、含水率低于 20% 且呈持续降低趋势, 常压断块井均低产、含水率高于 55% 且稳定—上升趋势; 白云岩层系内厚层泥岩为优质烃源岩, 提供充足油源; 断层封闭性控制油气聚集, 进而控制生烃型超压的分布, 超压成为油气富集的重要标志; 油气充注晚于断块—岩性圈闭形成时间, 使油气充注有效。

关键词: 泥质白云岩; 致密岩性油藏; 油藏非均质性; 石油地质; 岩石学。

中图分类号: P618.13 **文章编号:** 1000—2383(2017)12—2327—09 **收稿日期:** 2017—02—11

The Reservoir Heterogeneity Characteristics and Affecting Factors of Tight Lacustrine Dolomite Reservoirs

Yao Yue^{1,2}, Wang Gang³, Li Le², Liu Yonghe⁴

1. *Geology department, Rice Universit, Houston TX77005, USA*
2. *Key Laboratory of Tectonics & Petroleum Resources of the Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*
3. *Xinjiang Coal Geology Bureau Xinjiang, Uygur 830091, China*
4. *4th Oil Production Plant, PetroChina Dagang Oilfield Company, Tianjin 300280, China*

Abstract: Lacustrine argillaceous dolomite reservoir has been found the III-5 Member of Shahejie Formation, Tanggu District, Bohai Bay Basin, China, which buried depth is 2 800—3 600 m and keeps oil in the fault block-lithologic argillaceous dolomite reservoir. Considering structure and sedimentary background, the research summarizes reservoir characteristics mainly includes lithologic character, reservoir property and hydrocarbon distribution. At the same time, the paper provides the controlling factors and pattern of hydrocarbon accumulation through integrated analysis of source-reservoir-seal combination and evolution of tectonics, diagenesis and hydrocarbon accumulation. The results show that reservoir lithologic is mainly dolomite and argillaceous dolomite and belongs to fracture-pore reservoir of ultra low porosity and permeability, whose reservoir space, to a large extent, includes intercrystalline pore, secondary dissolved pore, dissolved fractures and fractures. Overpressure is closely correlated with the hydrocarbon distribution. The overpressure wells show medium-high production and their water cuts are under 20% with a continuing downward trend; while instead, the normal wells show low production and water cuts are above 55% owning a smooth or upward trend. Mudstone is high-quality source rocks and can supply enough oil to dolomite reservoir. The quantity of hydrocarbon generation and reserves capacity of dolomite are both closely relevant to abundant algae laminae. Fault

基金项目: “十三五”国家油气专项“近海大中型油气田形成条件及勘探技术”(No. 2016ZX05024-006); 中国石油股份有限公司大港油田重点项目“塘沽地区沙三⁵ 特殊岩性体沉积特征及油藏综合评价”(No. DGYT-2012-JS-566)。

作者简介: 姚悦(1992—), 女, 在读研究生, 主要从事油气储层预测研究。ORCID: 0000-0002-1125-8803. E-mail: missstaru@gmail.com

引用格式: 姚悦, 王刚, 李乐, 等, 2017. 湖相致密白云岩不均一油藏特征及主控因素. 地球科学, 42(12): 2327—2335.

sealing controls the hydrocarbon accumulation and distribution of overpressure, whose one of the main driving force is hydrocarbon generation. The overpressure has been the significant mark of hydrocarbon enrichment. The hydrocarbon-charging time is behind the fault sealing, thus hydrocarbon-charging is effective.

Key words: argillaceous dolomite; tight-lithologic reservoirs; reservoir heterogeneity; petroleum geology; petrology.

0 引言

湖相白云岩油藏是一种特殊的油藏类型,普遍有良好油气显示,受到广泛关注.国外,主要在南大西洋边缘的巴西及安哥拉等国近海的断陷湖盆、东非大裂谷控制的断陷湖盆及北美洲各盆地古近系绿河组地层等发现湖相碳酸盐岩储层,并在南大西洋边缘的白垩系盐下碳酸盐岩地层发现好的油气聚集(Lomando,1996;Arribas *et al.*,2004;Christopher,2008;Sarg *et al.*,2013);国内,先后在陆相盆地的古近系(渤海湾盆地沙河街组一段及四段、泌阳凹陷核桃园组、苏北盆地阜宁组、柴达木盆地西部下干柴沟组至上油砂山组、江汉盆地潜江组等)、白垩系(松辽

盆地青山口组、青西凹陷下沟组、二连盆地腾格尔组等)、侏罗系(四川盆地大安寨组)、二叠系(准噶尔盆地西北缘风城组、三塘湖盆地芦草沟组)地层中发现湖相碳酸盐岩储层及工业油气显示(杜韞华,1990;周书欣,1992;孙钰等,2008;冯有良等,2011).少数学者等将白云质泥岩夹白云岩型油藏归为页岩油范畴(武晓玲等,2013),但多数学者及研究机构多将其定义为致密油(贾承造和邹才能,2012).目前,国内外所发现的湖相碳酸盐岩以生物灰岩、白云岩及混积岩为主,此类致密油藏具有“源一储互层或紧邻、储层致密,中低丰度但平面连续成藏”等非常规油气资源的一般特征,储集性与含油性均较好的“甜点”成为勘探重点(匡立春等,2012).但是,由于储层致密、含油性不均一、裂缝发育等因素使得储层非均质

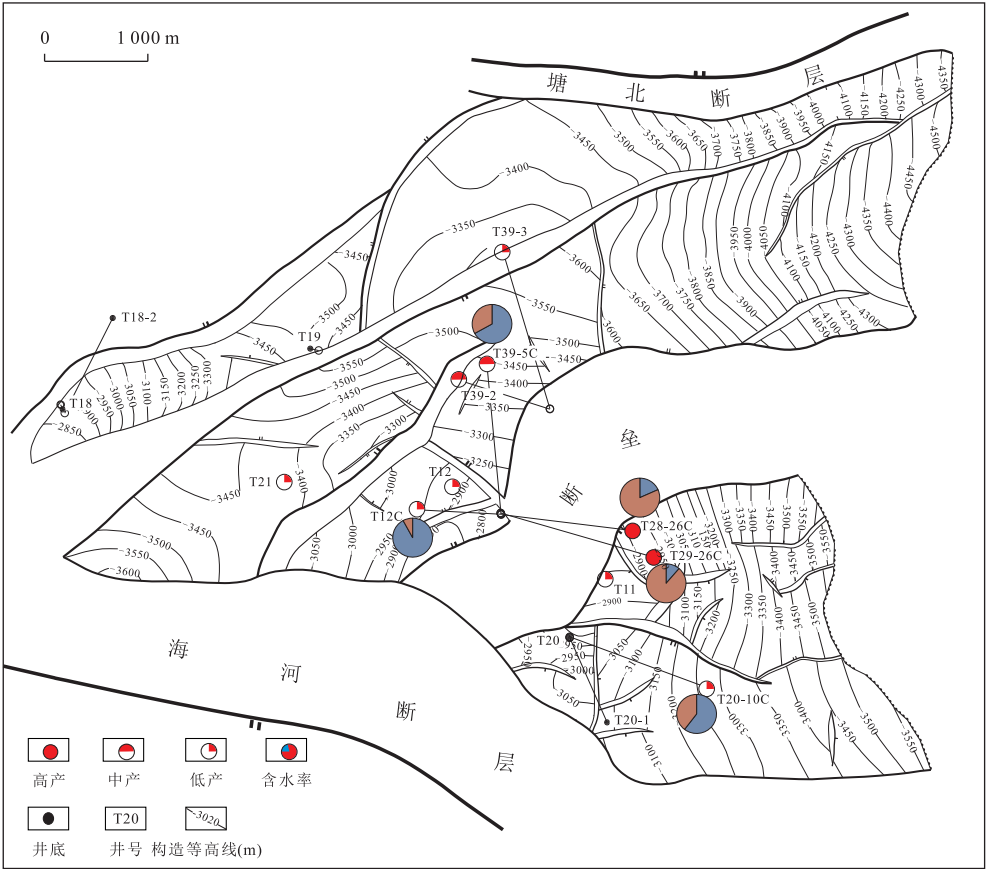


图 1 塘沽地区沙三⁵段顶面构造、井位分布及生产特征图

Fig.1 Top surface structure map with wells position and producing properties of Es₃⁵ in Tangguo area

据赵耀等(2016)修改

性强,油井产量差异大,勘探开发成功率低、风险高,缺少油气勘探开发成功的实例。

2012 年以来,大港油田在塘沽地区沙三⁵亚段勘探发现裂缝—孔隙型致密湖相泥质白云岩油藏,并钻获初期自喷日产 99.7 t 的高产工业油流(大港油田内部资料,2013)。在不同断块所钻 5 口试采井的生产表现差异极大(图 1),反映了储层物性、裂缝、油水分布等特征的复杂性,油藏不均一性特征及成藏规律的认识不清,这对油藏开发造成极大阻碍。本文利用岩心、实验测试及试油试采等资料对油藏特征进行总结,并结合烃源岩、储集层、构造等要素对成藏主控因素及成藏模式进行探讨,以解析该油藏的致密储层特征及油气富集规律。

1 构造及沉积背景

渤海湾盆地为中国东部重要的中、新生代裂谷盆地,以中生界地层为基底(冯有良等,2010)。沙一末至东营组沉积时期,黄骅坳陷发育最强烈的构造活动,断裂走向从 NE 向转变为 EW 向,近 EW 向的新港、海河及塘北断层的活动形成塘沽—新港潜山构造带(周立宏等,2011),表明研究区在沙三段沉积时期仍为洼陷。研究区位于塘沽—新港潜山隆起中部,受海河断层、塘北断层南北夹持,总面积约 30 km²。研究区内主要发育近 NEE 向的 4 条次级正断层,中部发育断垒,整体呈中部高、四周低的构造格局。研究区断裂活动强烈,7 个断块的沙三⁵顶面埋深为 2 800~4 520 m,断距 10~280 m(图 1)。

沉积地层方面,黄骅坳陷中北部发育裂陷作用较晚,因此研究区及北塘次凹均未沉积比沙三段更早的孔店组、沙四段地层。沙三段以厚层暗色泥岩为主,分为沙三¹~沙三⁵亚段,并以沙三⁴和沙三⁵亚段为本区域最重要的生油层。沙三⁵亚段湖相泥质白云岩层系厚度 29.50~282.86 m,属于构造沉降背景下,半深湖相沉积的一套深灰色泥岩类与白云岩类呈互层状的岩性组合(李明刚等,2009;李乐等,2015a,2015b;林培贤等,2017)。

2 泥质白云岩油藏不均一特征

本区泥质白云岩油藏埋深 2 800~3 600 m,含油层最厚达 60 m,属中深—深层油藏。原油相对密度为 0.883 8 g/cm³,原油粘度为 167.87 mPs·s (50℃),为中质原油。综合各井试油试采数据,认为储层致密,使油水分异较差、油水过渡带厚度大、无统一油水界面,属于致密—裂缝型储层之断块—岩性油藏(图 2)。

2.1 岩石相类型

按泥质含量高低将岩性分为 4 类:白云岩、泥质白云岩、白云质泥岩及泥岩(李乐等,2015a;林培贤等,2017)。纵向上,泥质白云岩层系上下部均为巨厚层泥岩;平面上,白云岩类呈中心厚(62.5 m)、向外减薄尖灭的似透镜体形态。受古气候影响,湖平面频繁升降期沉积的过渡类岩性泥质白云岩、白云质泥岩常呈中薄层~纹层状互层(图 3c~3f),而稳定水体环境沉积的较纯岩性泥岩、白云岩则厚度较大(图

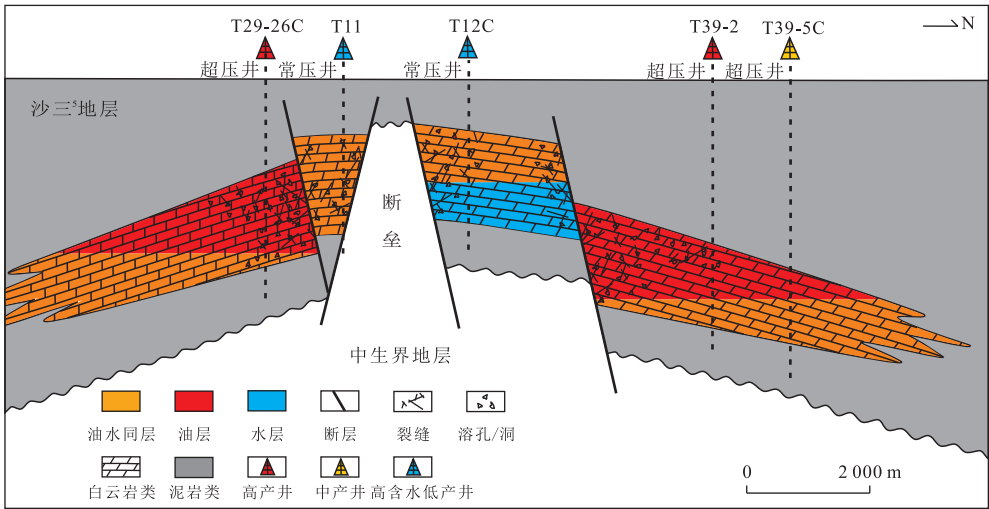


图 2 沙三⁵亚段泥质白云岩油藏剖面简化图
Fig.2 Dolomite eservoir section of ES3-5

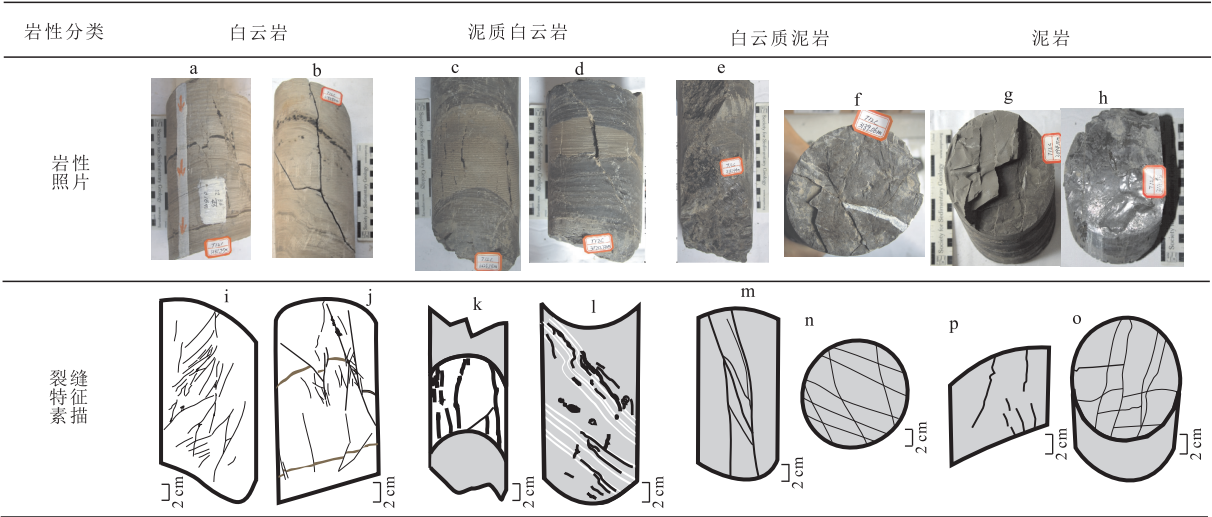


图 3 岩石相类型与裂缝特征素描
Fig.3 Fracture properties and lithologic types sketch

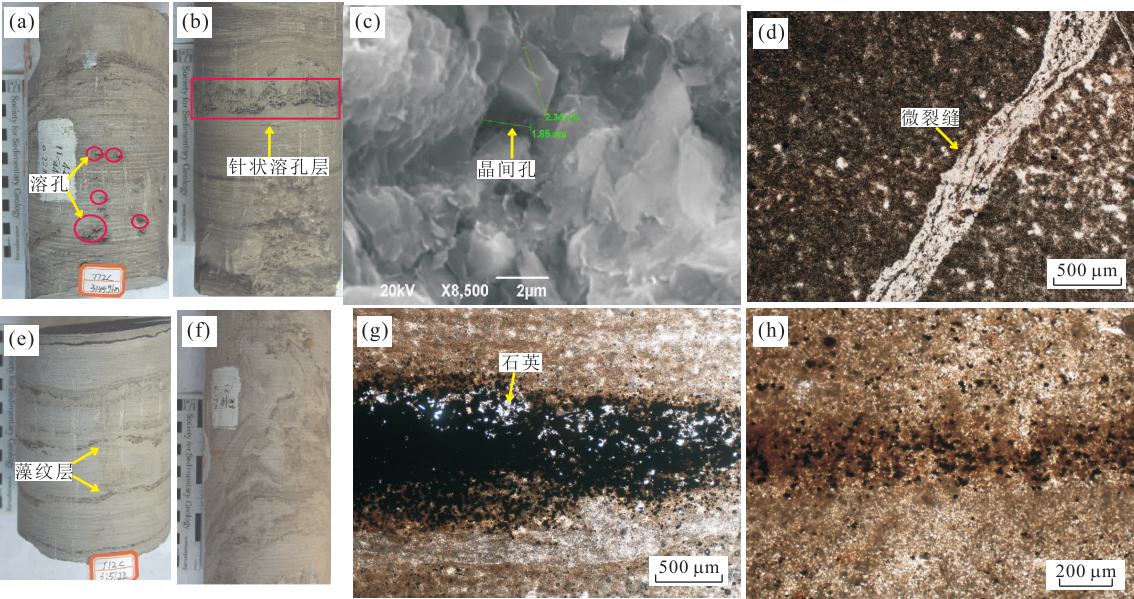


图 4 白云岩储集空间特征
Fig.4 Reservoir space of dolomite rock

a.豆状溶孔,白云岩,3 144.96 m;b.针状溶孔,白云岩,3 142.31 m;c.晶间孔,SEM 图像,泥质白云岩,3 121.70 m(资料来自南京大学);d.方沸石充填的微裂缝,单偏光,10×5 倍,泥质白云岩,3 131.05 m;e.藻纹层与针状溶孔,白云岩,3 151.12 m;f.变形藻纹层与针状溶孔,白云岩,3 152.31 m;g.藻纹层与石英长石碎屑层,单偏光,10×5 倍,白云岩,3 160.39 m;h.藻纹层与泥质纹层,单偏光,10×10 倍,白云岩,3 143.17 m

3a~3b、3g~3h),白云岩单层厚度可达 9 m.

2.2 裂缝发育特征

裂缝的发育,使低渗—特低渗储层具备较好的储、产油能力.对 T12C 井 77.45 m 岩心裂缝观察发现,本区裂缝以剪切缝为主,裂缝填充物主要为碱性热液活动形成的方沸石.根据单井统计,全区裂缝孔隙度主要分布于 0.15%~0.39%,最高可达 1.16%.裂缝发育特征(裂缝线密度、开度)与岩性关系密切.

厚层白云岩的裂缝线密度最高,多为延伸较短的剪切微裂缝(图 3i~3j);薄互层段泥质白云岩的裂缝线密度较高,多为大开度张裂缝(图 3k~3l);泥岩类的裂缝线密度最低,多为闭合的剪切微裂缝(图 3m~3o).

2.3 基质物性特征

储层基质岩性主要为白云岩、泥质白云岩,其矿物成分以白云石、方沸石为主,还有陆源的石英、长

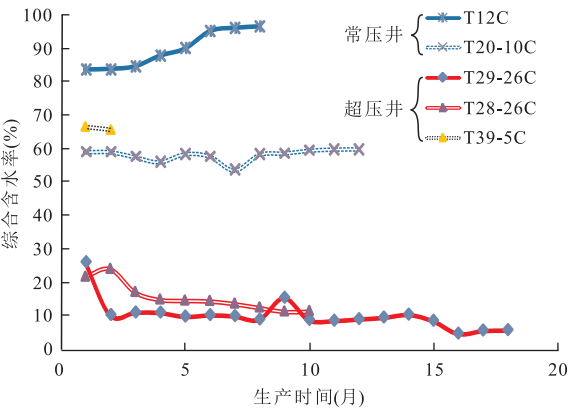


图 5 试采井的综合含水率变化趋势
Fig.5 Water cut rate in test wells

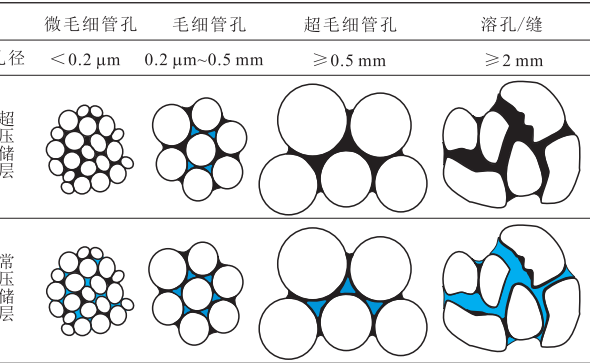


图 6 亲油层的油水赋存状态模式图

Fig.6 Oil and water occurrence state in oil-wet reservoir

石等.31 块白云岩类岩样的气测孔隙度为 7.48%~16.83%,平均为 11.41%,气测渗透率为 0.001 6~0.241 1×10⁻³ μm²,平均仅 0.066 58×10⁻³ μm².经各井物性参数计算及统计,全区储层孔隙度主要分布于 7%~18%,属于中—低孔、低渗—特低渗储层.储集空间主要为晶间孔、溶孔、裂缝及溶缝(图 4a~4d).岩石薄片在 100 倍率镜下观察仍难以辨别晶间孔,扫描电镜观察晶间孔直径多小于 3 μm,多接近纳米级,结合孔渗特征,均表明储层的微孔隙发育.此外,气测孔隙度最高的 4 个样品,其岩心特征均呈针状溶孔成层发育(图 4e~4f),属于藻纹层经生排烃过程形成的有机质孔或溶蚀孔,镜下观察为藻类等有机质与石英、长石、泥质等陆源碎屑混杂成层富集(图 4g~4h).

2.4 含油性与超压特征

本区沙三段地层普遍发育压力系数大于 1.5 的超压,但断层的剧烈活动,导致部分断块泄压呈正常压力状态.研究区沙三⁵亚段分别有 5 口井进行试油、试采,但各井产能及含水率差异极大(图 1).不同

压力井的生产特征:分布于超压断块的 4 口井,其单井平均日产油为 3.71~12.51 t,综合含水率主要为 0~18.39%,且呈缓慢下降趋势;而分布于常压断块的 6 口井,其单井平均日产油仅 0.05~0.66 t,综合含水率分布于 59.76%~98.29%,且呈平稳—升高趋势,表明含油性与超压存在明显相关性(图 5).

超压断块含水率降低趋势延续时间长,主要与储层岩石亲油、断块—岩性油藏特征有关,白云岩类样品的润湿性指数 AI 分布于 -0.50~-1.68,表明本区为亲油—强亲油储层.超压断块内,较高的流体势使烃类流体进入微毛细管孔隙,含油饱和度最高可达 75%以上,但毛细管孔隙却因贾敏效应而在孔隙中央产生束缚水;常压断块内,油气顺开启断层运移,但储层亲油会使油气运移路径的细孔喉处产生大量束缚油,微毛细管孔隙因流体势较低,原油无法进入改变其亲水性而主要含水.根据常压、超压地层的油水赋存模式(图 6),在生产压差下,地层压力平衡被瞬间打破,超压地层孔隙中央的束缚水随原油产出,且断块—岩性油藏无边低水补充,因此综合含水率逐渐降低;而常压地层则因可动油越来越少,产量低且综合含水率呈上升趋势.

3 成藏主控因素及成藏模式探讨

在油藏特征分析基础上,结合沉积、构造、成岩、生排烃及油气运聚等资料,分析泥质白云岩油藏的成藏主控因素:烃源岩、储集层、圈闭及融合构造、成岩、生烃演化的成藏模式.

3.1 湖相暗色泥岩提供充足油源

50 块岩样的岩石热解、干酪根显微组分及镜质体反射率等实验数据显示:41 个泥岩类样品的有机碳含量(TOC)为 0.66%~3.36%(平均 1.98%),9 个泥质白云岩类样品的有机碳含量为 0.73%~2.28%(平均 1.41%),以 I 型和 II 1 型干酪根为主,主要为好—优质烃源岩(图 7b);镜质体反射率(R_o)为 0.65%~0.78%,结合岩石热解最高峰温 T_{max}指标(图 7a),表明热演化程度以低成熟—中成熟为主,可能与超压对有机质热演化程度的抑制作用有关(邓荣敬等,2005).根据烃源岩评价结果,从微观角度分析,富集的藻纹层,为腐泥型生油母质的重要来源(图 4g~4h).巨厚层暗色泥岩作为良好烃源岩,易形成“近生近储”型油气聚集.

3.2 裂缝—孔隙型泥质白云岩储层是油气储集关键

裂缝对成岩作用、油气运移意义重大.本区断层

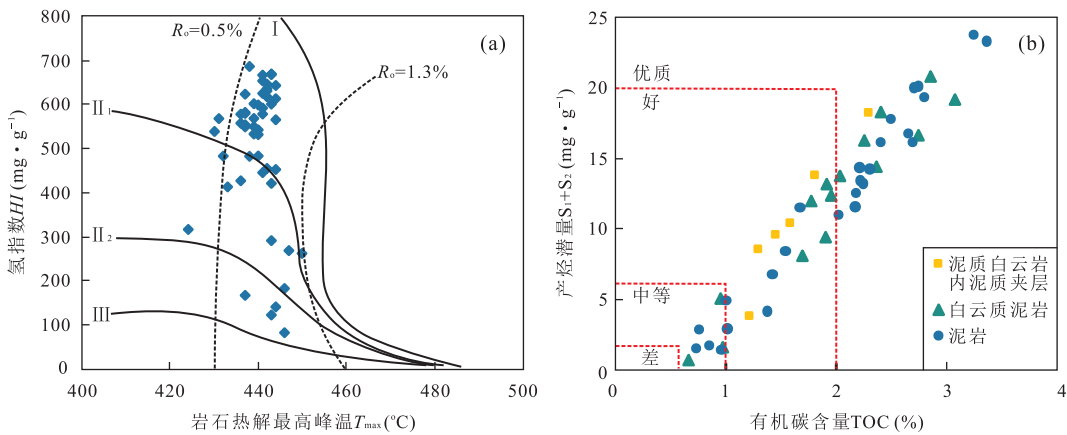


图 7 有机质类型、成熟度(a)及烃源岩评价(b)

Fig.7 Organic matter type, maturity (a), and the evaluation of the hydrocarbon source rocks (b)

及裂缝主要为沙一末至东营期的剧烈构造活动形成,而大规模生排烃期为东营组沉积末期及明化镇组沉积中期(邓荣敬等,2001),生排烃期晚于裂缝形成期,因此裂缝对成烃流体的运移起重要影响.裂缝不仅提供了部分储集空间,更重要的是为有机酸及烃类流体提供运移通道,使储层发生强烈溶蚀形成大量溶蚀孔/缝,极大改善了储层物性,局部井段孔隙度整体达到高于 20% 的高孔级别,成为沙三⁵ 亚段烃源岩层系内极好的裂缝—孔隙型储集体.图 8 为岩心裂缝密度统计结果,显示脆性白云岩更易产生裂缝,岩心观察反映裂缝内油斑丰富.

3.3 断层封闭性控制油气聚集及超压分布

在我国东部古近纪断陷湖盆和西部古—中生界湖相盆地,如泌阳凹陷核桃园组、酒西坳陷下沟组、三塘湖盆地芦草沟组等,白云岩储层普遍发育在湖盆中心,与半深湖—深湖相暗色泥岩共生.沙三⁵ 亚段具相似的源储共生特征,巨厚层异常高压泥岩将泥质白云岩层系包裹形成极好的岩性圈闭.此时,断层封闭性对油气聚集的影响意义更大.

沙三段普遍沉积厚度超千米的泥岩,差异压实和生烃作用导致的超压普遍发育,海河断层等油源断裂将沙三⁵ 亚段烃源岩与下部奥陶系潜山、上部东营组砂岩沟通(罗群,2002).研究区内,不同断块的压力特征差异较大(1.11~1.59),断层对压力系统的分隔作用明显.从岩性配置及裂缝填充物分析,认为泥岩涂抹、“砂泥对接”及新近纪区域性大规模碱性热液活动导致的方沸石胶结是断层封闭的形成机理(于志超等,2012;王建忠等,2013).

超压与油气聚集密切相关,超压顶界面(约 2 500 m)与生油门限(2 500 m)重叠也验证了该观

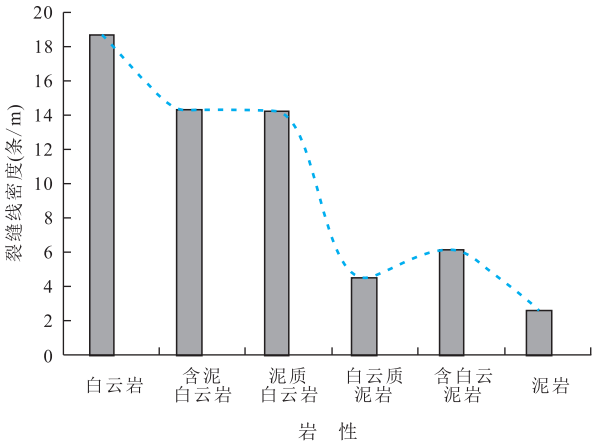


图 8 裂缝发育程度与岩性关系图

Fig.8 Fracture density and lithologic types diagram

点(邓荣敬等,2006).断层封闭控制烃类聚集,进而影响生烃型超压分布(图 2).超压成为断层封闭、油气富集的重要标志.

3.4 成藏模式探讨

基于前述研究,根据构造、成岩及成藏演化过程提出研究区泥质白云岩油藏的成藏模式(图 9).

沉积过程:沙三⁵ 沉积时期,近海陆相湖盆的碱性、半咸—咸水介质环境条件下,白云岩在湖盆深部的中生界地层古隆起上进行半深水沉积,因受沧县物源及长期火山活动的影响,储层岩石含较多与火山活动有关的方沸石及呈层状沉积的石英、长石及泥质等陆源碎屑,形成矿物成分复杂的泥质白云岩层系.

构造活动:沙二段至东营组沉积时期,海河断层、塘北断层的长期活动,使研究区抬升并形成复杂断块.脆性岩层如白云岩、泥质白云岩发生破裂,裂缝发育.断层活动还使断层面发生厚层泥岩的涂抹效应或“砂泥对接”,使部分断层产生封闭性.

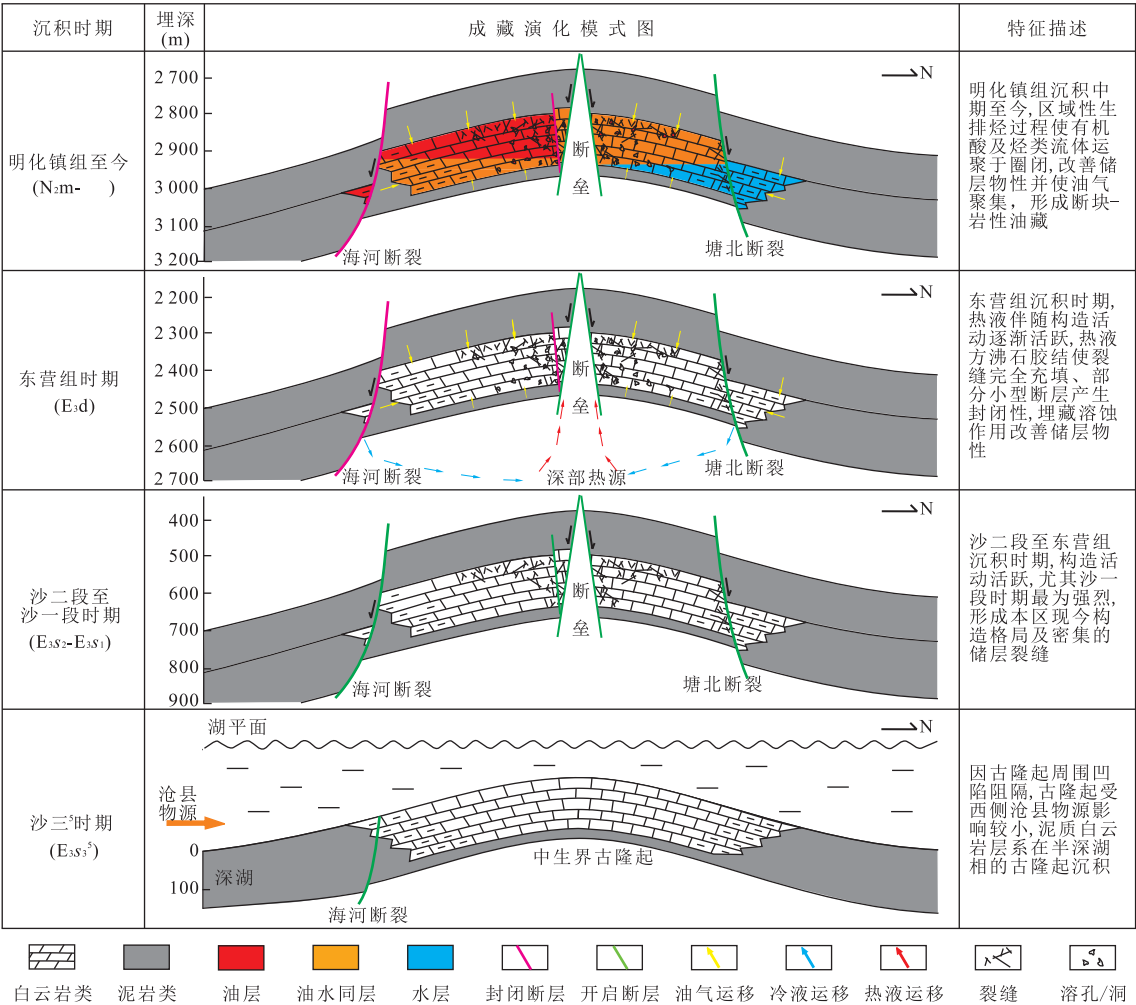


图 9 沙三⁵亚段泥质白云岩油藏成藏模式图

Fig.9 Oil accumulation pattern of dolomite reservoir in E₃s₃⁵

主要成岩演化:沙二段至明化镇组沉积时期,以埋藏溶蚀、方沸石充填为主。沙二段至东营沉积末期,黄骅拗陷中北部构造与火山活动发育,深部热液沿主要断层上涌,以致断层周围的裂缝、孔隙发生方沸石胶结,形成或增强断层的封闭性,形成良好的断块-岩性圈闭;东营组与明化镇组时期,伴随生烃过程产生的有机酸流体沿裂缝运移,使储层产生强烈的埋藏溶蚀,极大改善储层物性。

成藏过程:东营组末期及明化镇组沉积中期,是本区域重要的两个生排烃高峰期。沙三⁵地层先后两次进入埋深 2 500 m 的生油门限开始生烃(邓荣敬等,2001),烃类流体在断块-岩性圈闭内不断聚集形成超压,而在断层未封闭的断块,烃类流体沿油源断裂运移到上下部地层而未形成超压。白云岩类储层致密、具良好生油能力及亲油性,因此储层普遍含油、油水过渡带厚度大,具油水分异特征,但超压断块油气聚集更好。

4 结论

- (1)研究区储层岩性、物性、裂缝复杂,不均一性强,以白云岩、泥质白云岩为主,呈中—低孔、低渗—特低渗特征,微孔隙发育,储集空间主要为晶间孔、溶孔、裂缝及溶缝,属于非常规裂缝低渗—致密储层类型。
- (2)超压单元与油气聚集密切相关,超压断块的油气丰度明显高于常压断块,超压控制中高产井分布,综合含水率低于 20%且呈降低趋势,而常压断块全部为低产井,综合含水率高于 55%且呈稳定—上升趋势。
- (3)成藏主控因素以储集层岩性、裂缝发育程度、高压区块封闭性为关键因素。沙三⁵亚段暗色泥岩为好—优质烃源岩;封闭断层、厚层超压泥岩与裂缝—孔隙型白云岩储层组合形成好的断块-岩性油藏。

References

- Arribas, M. E., Bustillo, A., Tsige, M., 2004. Lacustrine Chalky Carbonates; Origin, Physical Properties and Diagenesis (Palaeogene of the Madrid Basin, Spain). *Sedimentary Geology*, 166(3–4): 335–351. doi: 10.1016/j.sedgeo.2004.01.012
- Christopher, A. S., 2008. Lacustrine Basins as Mixed Siliciclastic-Carbonate Systems, Examples from the East African Rif. *Geological Society of America*, 40(6): 95.
- Deng, R. J., Xu, B., Qi, J. F., et al., 2006. Sedimentation Characteristics and Factors Affecting the Reservoir in Palaeogene Shasan Member of Beitang Sag, Huanghua Depression. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25(3): 230–236 (in Chinese with English abstract).
- Deng, R. J., Chai, G. Q., Yang, H., et al., 2001. Forming Conditions and Distribution Characteristics of Tertiary Oil and Gas Pools in Beitang Sag. *Petroleum Exploration and Development*, 28(1): 27–29 (in Chinese with English abstract).
- Deng, R. J., Xu, B., Qi, J. F., et al., 2005. Petroleum Geological Role of Paleogene Overpressure Reservoirs in Tanggu-Xincun of Beitang Sag, Bohai Bay Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 32(6): 46–51 (in Chinese with English abstract).
- Du, Y. H., 1990. Eocene Lacustrine Carbonate Rocks and Sedimentary Model in Bohai Bay Region. *Oil & Gas Geology*, 11(4): 376–392+465–466 (in Chinese with English abstract).
- Feng, Y. L., Zhang, Y. J., Wang, R. J., et al., 2011. Dolomites Genesis and Hydrocarbon Enrichment of the Fengcheng Formation in the Northwestern Margin of Junggar Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 38(6): 685–692 (in Chinese with English abstract).
- Feng, Y. L., Zhou, H. M., Ren, J. Y., et al., 2010. Paleogene Sequence Stratigraphy in the East of the Bohai Bay Basin and Its Response to Structural Movement. *Science China: Science Terrae*, 40(10): 1356–1376 (in Chinese).
- Jia, C. Z., Zou, C. N., Li, J. Z., et al., 2012. Assessment Criteria, Main Types, Basic Features and Resource Prospects of the Tight Oil in China. *Acta Petrolei Sinica*, 33(3): 343–350 (in Chinese with English abstract).
- Kuang, L. C., Tang, Y., Lei, D. W., et al., 2012. Formation Conditions and Exploration Potential of Tight Oil in the Permian Saline Lacustrine Dolomitic Rock, Junggar Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 39(6): 657–667 (in Chinese with English abstract).
- Li, M. G., Qi, J. F., Yang, Q., et al., 2009. Cenozoic Structure Features of Huanghua Depression and its Structure Dynamics Model. *Acta Geoscientia Sinica*, 30(2): 201–209 (in Chinese with English abstract).
- Li, L., Yao, G. Q., Liu, Y. H., et al., 2015a. Characteristics of Analcime-Dolomite Reservoir from Shahejie Formation in Well Tang10 Block of Danggang Oilfield. *Acta Petrologica Sinica*, 36(10): 1210–1220 (in Chinese with English abstract).
- Li, L., Yao, G. Q., Liu, Y. H., et al., 2015b. Major and Trace Elements Geochemistry and Geological Implications of Dolomite-Bearing Mudstones in Lower part of Shahejie Formation in Tanggu Area, Eastern China. *Earth Science*, 40(9): 1480–1496 (in Chinese with English abstract).
- Lin, P. X., Lin, C. M., Yao, Y., et al., 2017. Characteristics and Causes of Analcime Distributed in Dolomite of the Member 3 of Paleogene Shahejie Formation in Beitang Sag, Bohai Bay Basin. *Journal of Palaeogeography*, 19(2): 241–256 (in Chinese with English abstract).
- Lomando, A. J., 1996. Exploration for Lacustrine Carbonate Reservoirs: Insights from West Africa; ABSTRACT. *AAPG Bulletin*, 80(8): 1308–1309. doi: 10.1306/64ed93d0-1724-11d7-8645000102c1865d
- Luo, Q., 2002. Fault Controlling Hydrocarbon Theory and Petroleum Exploration Practice. *Earth Science*, 27(6): 751–756 (in Chinese with English abstract).
- Sarg, J. F., Suriamin, N., Tinavsuu-Milkeviciene, K., et al., 2013. Lithofacies, Stable Isotopic Composition, and Stratigraphic Evolution of Microbial and Associated Carbonates, Green River Formation (Eocene), Piceance Basin, Colorado. *AAPG Bulletin*, 97(11): 1937–1966. doi: 10.1306/07031312188
- Sun, Y., Zhong, J. H., Yuan, X. C., et al., 2008. Review and Prospect of the Study on Domestic Lacustrine Carbonate Rocks. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 15(5): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. Z., Xiang, C. F., Pang, X. Q., 2013. Faultsealing Mechanisms in the Carbonate Sequence. *Journal of China University of Mining & Technology*, 42(4): 616–624 (in Chinese with English abstract).
- Wu, X. L., Gao, B., Ye, X., et al., 2013. Shale Oil Accumulation Conditions and Exploration Potential of Faulted Basins in the East of China. *Oil & Gas Geology*, (4): 455–462 (in Chinese with English abstract).
- Yu, Z. C., Liu, L., Sun, X. M., et al., 2012. Evidence of Paleogene Thermal Fluid Activities and Their Impact on Porosity-Permeability of Reservoir in Qikou Sag. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(Sup. 3): 1–13 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y., Yao, G. Q., Mu, L. H., et al., 2016. Characteristics

and Controlling Factors of Fractures in Lacustrine Dolostones Reservoirs in Tanggu District, *Earth Science*, 41(2):252—264(in Chinese with English abstract).

Zhou, L. H., Lu, Y., Xiao, D. Q., et al., 2011. Basinal Texture Structure of Qikou Sag in Bohai Bay Basin and its Evolution, *Natural Gas Geoscience*, 22(3): 373—382 (in Chinese with English abstract).

Zhou, S. X., 1992. The Research Status of the Study on Domestic Lacustrine Carbonate Rocks, *Oil & Gas Geology*, 13(4): 461—462(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

邓荣敬, 柴公权, 杨桦, 等, 2001. 北塘凹陷第三系油气藏形成条件与油气分布. 石油勘探与开发, 28(1): 27—29.

邓荣敬, 徐备, 漆家福, 等, 2005. 北塘凹陷塘沽—新村地区古近系异常高压特征及其石油地质意义. 石油勘探与开发, 32(6): 46—51.

邓荣敬, 徐备, 漆家福, 等, 2006. 北塘凹陷古近系沙河街组三段沉积特征及储层的影响因素. 岩石矿物学杂志, 25(3): 230—236.

杜韞华, 1990. 渤海湾地区下第三系湖相碳酸盐岩及沉积模式. 石油与天然气地质, 11(4): 376—392+465—466.

冯有良, 张义杰, 王瑞菊, 等, 2011. 准噶尔盆地西北缘风城组白云岩成因及油气富集因素. 石油勘探与开发, 38(6): 685—692.

冯有良, 周海民, 任建业, 等, 2010. 渤海湾盆地东部古近系层序地层及其对构造活动的响应. 中国科学: 地球科学, (10): 1356—1376.

贾承造, 邹才能, 李建忠, 等, 2012. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景. 石油学报, 33(3): 343—350.

匡立春, 唐勇, 雷德文, 等, 2012. 准噶尔盆地二叠系咸化湖相

云质岩致密油形成条件与勘探潜力. 石油勘探与开发, 39(6): 657—667.

李乐, 姚光庆, 刘永河, 等, 2015a. 大港油田塘 10 井区沙河街组方沸石白云岩储层特征. 石油学报, 36(10): 1210—1220.

李乐, 姚光庆, 刘永河, 等, 2015b. 塘沽地区沙河街组下部含云质泥岩主微量元素地球化学特征及地质意义. 地球科学, 40(9): 1480—1496.

李明刚, 漆家福, 杨桥, 等, 2009. 渤海湾盆地黄骅坳陷新生代结构特征及构造动力学模式. 地球学报, 30(2): 201—209.

林培贤, 林春明, 姚悦, 等, 2017. 渤海湾盆地北塘凹陷古近系沙河街组三段白云岩中方沸石的特征及成因. 古地理学报, 19(2): 241—256.

罗群, 2002. 断裂控烃理论与油气勘探实践. 地球科学, 27(6): 751—756.

孙钰, 钟建华, 袁向春, 等, 2008. 国内湖相碳酸盐岩研究的回顾与展望. 特种油气藏, 15(5): 1—6.

王建忠, 向才富, 庞雄奇, 2013. 碳酸盐岩层系断层封闭机理研究. 中国矿业大学学报, 42(4): 616—624.

武晓玲, 高波, 叶欣, 等, 2013. 中国东部断陷盆地页岩油成藏条件与勘探潜力. 石油与天然气地质, (4): 455—462.

于志超, 刘立, 孙晓明, 等, 2012. 歧口凹陷古近纪热流体活动的证据及其对储层物性的影响. 吉林大学学报(地球科学版), 42(增刊 3): 1—13.

赵耀, 姚光庆, 穆立华, 等, 2016. 塘沽地区湖相白云岩储层裂缝特征及其控制因素. 地球科学, 41(2): 252—264.

周立宏, 卢昇, 肖敦清, 等, 2011. 渤海湾盆地歧口凹陷盆地结构构造及演化. 天然气地球科学, 22(3): 373—382.

周书欣, 1992. 我国湖相碳酸盐岩研究现状. 石油与天然气地质, 13(4): 461—462.