

文章编号: 1671-1505(2022)05-0871-23 DOI:10.7605/gdxb.2022.05.063

中国东部陆相断陷盆地成熟探区油气勘探新领域分析*

刘 震¹ 朱茂林¹ 李 晋² 刘惠民³ 王晓文⁴ 刘俊榜⁵

1 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

2 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206

3 中国石化胜利油田分公司油气勘探管理中心, 山东东营 257017

4 中国石油冀东油田公司勘探部, 河北唐山 063004

5 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

摘 要 经过 50 多年勘探开发, 中国东部陆相油气田均已进入勘探中后期阶段, 受石油地质认识局限性和勘探技术的限制, 待发现目标日趋隐蔽, 油气勘探难度日益增大。针对中国东部陆相断陷盆地深层低孔渗—致密砂岩储集层评价方法的局限性、深部砂砾岩储集体成因模式问题以及基岩风化壳形成和分布的复杂性问题, 作者经过近几年的探索和总结, 取得以下主要研究进展: (1) 基于砂岩储集层物性演化动力学原理, 提出了致密砂岩储集层动态评价的新思路和新方法, 指出过去评价较低的深部凹陷带低孔渗—致密砂岩体仍然具有较大的勘探潜力; (2) 运用地震地层学方法, 通过建立断陷盆地陡坡带斜向大型扇三角洲沉积模式, 指出斜向大型扇三角洲砂砾岩是断陷盆地深层有利的储集体, 可以作为下一步有利勘探方向; (3) 根据基岩风化壳双层结构新模式, 结合风化壳储集层改造—破坏—保存机理的动力学新模型, 指出断陷盆地中低部位是最有利风化壳储集层发育带, 断陷盆地缓坡内带(洼槽区)风化壳是下一步油气勘探的重要新领域。文中提出的上述 3 大勘探新领域不仅是对断陷盆地油气成藏模式的补充和发展, 更重要的是展现出中国东部断陷盆地深层常规和非常规油气勘探领域的巨大潜力, 为深化东部成熟盆地油气勘探指出了明确的方向。

关键词 断陷盆地 致密砂岩 储集层动态评价 扇三角洲 风化壳储集层 勘探新领域

第一作者简介 刘震, 男, 1963 年生, 1984 年毕业于西北大学地质学系, 1990 年毕业于石油大学(北京)并获博士学位, 现为中国石油大学(北京)地球科学学院教授、博士生导师, 主要从事石油地质学基础及应用研究。E-mail: liuzhenjr@163.com。

中图分类号: TE122 文献标志码: A

Analysis of new fields for oil and gas exploration in mature exploration areas of continental rifted basins in eastern China

LIU Zhen¹ ZHU Maolin¹ LI Jin² LIU Huimin³ WANG Xiaowen⁴ LIU Junbang⁵

1 College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

2 Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China

3 Manage center of Oil and Gas Exploration, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Shandong Dongying 257017, China

4 Exploration Department of Jidong Oilfield Company, PetroChina, Hebei Tangshan 063004, China

5 Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China

* 庆贺西北大学建校 120 周年!

国家重大科技专项“岩性油气藏成藏动力、临界条件与分布模式”(编号: 2011ZX05001-001-004)资助。[Financially supported by the National Major Project of Science and Technology “Accumulation dynamics, critical conditions and distribution models of lithologic reservoirs” (No. 2011ZX05001-001-004)]

收稿日期: 2022-08-23 改回日期: 2022-08-29

Abstract After more than 50 years of large-scale exploration and development, onshore oil and gas fields in eastern China have entered the middle and late stage of exploration. Due to the limitations of petroleum geological knowledge and exploration technology, the targets to be discovered are increasingly hidden, and the difficulty of oil and gas exploration is increasing day by day. In view of the limitations of evaluation methods for deep low-porosity and low-permeability tight sandstone reservoirs, the genetic models of deep glutenite reservoirs and the complexity of the formation and distribution of bedrock weathering crust in continental rifted basins in eastern China, the author has carried out systematic analysis and summary and made the following research progress: (1) Based on the dynamic principle of physical property evolution of sandstone reservoirs, a new idea and method for tight sandstone reservoirs dynamic evaluation are put forward and it is pointed out that low-porosity and permeability tight sandstones in deep sags with low evaluation in the past still have exploration potential; (2) Using the seismic stratigraphy method, the sedimentary model of oblique large fan deltas in the steep slope zone of rifted basins is established. It is suggested that the large-scale fan delta glutenites be favorable reservoirs in deep rifted basins and can be used as the next favorable exploration direction; (3) According to the new model of two-layer texture of bedrock weathering crusts and combined with the new dynamic model of weathering crust reservoir transformation-destruction-preservation mechanism, it is pointed out that the middle and low parts of the rifted basin are the most favorable zones for weathering crust reservoir development, and the inner gentle slope zone (subsag areas) of the rifted basin is also the favorable exploration zone for bedrock weathering crust reservoir. The above three new exploration fields proposed in this paper not only the supplement and develop the hydrocarbon accumulation models of rifted basins, but also show the great potential of conventional and unconventional oil and gas exploration in deep-layer rifted basins in eastern China, and point out a clear direction for deepening the oil and gas exploration in mature basins in eastern China.

Key words rifted basin, tight sandstone, reservoir dynamic evaluation, fan delta, weathering crust reservoir, new exploration field

About the first author LIU Zhen, born in 1963, graduated from the Department of geology, Northwest University in 1984, and graduated from the China University of Petroleum (Beijing) in 1990 with a doctoral degree. Now, he is a professor and doctoral supervisor of the College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), and is mainly engaged in basic and applied research of petroleum geology. E-mail: liuzhenjr@163.com.

1 概述

中国东部古近纪以来断陷盆地主要包括渤海湾、二连、苏北、东海、南海诸盆地以及南襄、江汉、南华北等沉积盆地, 油气资源量达 143.6 亿吨 (秦伟军和张中华, 2015), 资源潜力巨大。据自然资源部 2019 年统计, 中国东部陆相断陷盆地油气储量约占全国油气总储量的 38%, 经过 50 多年的大规模勘探开发, 取得了巨大的勘探成果。研究表明, 东部断陷盆地累计探明石油地质储量 63.84 亿吨, 平均资源探明程度为 49.4%, 而泌阳凹陷资源探明程度可达 74.93% (秦伟军, 2006; 张抗和门相勇, 2014)。显然, 东部探区总体上已进入

中—高勘探阶段。随着勘探程度的不断提高, 勘探方向逐渐转向埋藏深度相对较大的复杂油气勘探领域。经过最近 20 多年的探索性研究和深化, 国内勘探研究人员在陆相断陷盆地油气形成与主控因素研究 (李丕龙等, 2004; 刘震等, 2005, 2006a, 2006b; 徐长贵, 2013)、成藏机理与分布模式分析 (陈冬霞等, 2006; 庞雄奇等, 2007; 于兴河等, 2007)、油气富集理论 (Zhao *et al.*, 2011; 赵贤正等, 2011, 2017, 2018) 与潜在资源量 (秦伟军, 2006) 等方面取得了大量新的研究成果。随着勘探认识和技术不断提升, 中国东部陆相断陷盆地油气勘探不断取得突破, 在深部的低孔渗—

致密砂岩储集层、扇三角洲砂砾岩储集层以及基岩风化壳储集层等领域均有所发现。在松辽盆地、渤海湾盆地和苏北盆地均发现相当规模的致密砂岩油气藏，在渤海海域发现的BZ19-6大型变质花岗岩潜山凝析气田，探明储量均十分可观（徐长贵等，2019），而在黄骅、辽河、冀中等拗陷相继发现的多个砂砾岩体有利圈闭也预示着砂砾岩体油气藏勘探进入新阶段，展现出中国东部陆相断陷盆地巨大的油气勘探潜力。

然而，随着东部勘探成熟区的不断发展，目前勘探和研究工作面临以下3方面的问题。一是深层致密砂岩储集层评价问题，现有的储集层评价方案更多的是针对储集层现今特征进行的评价，而忽略了成藏期储集层条件评价以及成藏期后储集性能继续发生演化的事实，从而导致致密储集层评价结果不理想。二是对陡坡带深层砂砾岩体物源认识不足且储集层质量普遍较差问题，现有模式更多地认为陡坡带储集体主要来源于短轴方向，对于是否存在其他方向的物源研究很少，对陡坡带早期有利储集体发育模式的复杂性认识较浅。三是对基岩风化壳结构及风化壳分布认识问题，目前常见的风化壳结构有“三分”结构或“四分”结构类型，但总体上讲这种分类属于静态的划分方案，没有考虑基岩风化壳一直经历着漫长地质演化过程，对风化壳的结构特征一直在发生变化的特点尚未研究；同时，由于对风化壳储集层所经历的改造—保存机制缺乏研究，导致难以解释和预测基岩风化壳横向差异性分布特点。

针对上述问题，本研究按照对成熟探区坚持不断反思和积极构建地质新认识的探索性思路，采用近年来在低孔渗—致密砂岩储集层、砂砾岩储集体和基岩风化壳储集层3个方面的典型研究实例，阐述中国东部陆相断陷盆地油气勘探新领域的地质基础和勘探潜力，旨在为中国东部陆相断陷盆地下一步油气勘探提供新的思路 and 理论支持。

2 深层低孔渗—致密砂岩储集层动态评价及勘探潜力

随着油气勘探的快速发展，致密砂岩储集层已成为新的研究和勘探热点。马洪等（2012）研究指出歧口凹陷歧北斜坡、辽河西部凹陷清水洼陷、

霸县凹陷文安斜坡等区带致密砂岩气资源量可达 $6 \times 10^{11} \sim 7 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，显示出极好的勘探前景。然而，受埋藏深度的影响，钻遇深层的探井数量整体上较少，深层致密砂岩储集层的勘探程度整体较低。此外，由于对致密砂岩储集层物性演化特征缺乏足够的认识，大多运用现今储集层评价结果来指导油气勘探，从而导致钻井成功率并不高，呈现出深层低孔渗—致密砂岩储集层虽展现出极大的勘探潜力、但勘探结果并不理想的现状。作者以中国东部断陷盆地深层低孔渗—致密砂岩为例，从砂岩储集层物性演化以及成藏过程2个方面出发，系统分析了致密砂岩储集层动态评价原理，并指出了该原理对油气勘探的指导意义。

2.1 现今储集层评价方案的局限性

现有储集层评价主要是在明确了构造背景和沉积相发育的基础上，通过岩矿测试、薄片观察、岩心物性分析并结合测井物性资料，分析储集层质量控制因素，进而明确优质储集层的展布规律（王化爱等，2009；陈蓉等，2013）。前人利用不同的储集层参数制定了不同的储集层评价标准，Leverson（2006）根据现今砂岩储集层的物性值来评价储集层；杨正明等（2006）在研究致密砂岩储集层的过程中发现，仅采用孔、渗和中值半径等参数很难有效地对砂岩储集层评价，需要结合储集层环境因素和喉道半径对储集层进行评价。尹昕和应文敏（2013）鉴于低孔渗砂岩储集层内部非均质性强的特点，提出要结合岩石学特征、孔渗特征、孔隙类型和孔隙结构的差异性来对储集层进行评价。由上述研究成果可以看出，现有储集层评价虽然可以选择多种参数来对储集层特征进行表征，但本质上还是对储集层现今特征的描述及评价，是一种“静态”的储集层评价方案，只能反映现今储集层的特征却不能很好地表达成藏期后储集层发生的一系列变化，同样也不能准确地反映关键成藏期砂岩储集层性质，难以把握住储集层评价的本质。

此外，现有的静态储集层评价结论通常与实际的勘探结果不一致。如刘明洁等（2014）研究东营凹陷牛庄洼陷沙三中上亚段岩性油藏发现，在具有相同储集砂体和相似断层输导的情况下，现今砂岩孔隙度分布与油气分布不一致，具体表现为：高孔隙砂岩不含油而低孔隙砂岩含油；具有相同物性的砂岩储集层有的含油而有的不含油；含油砂体现

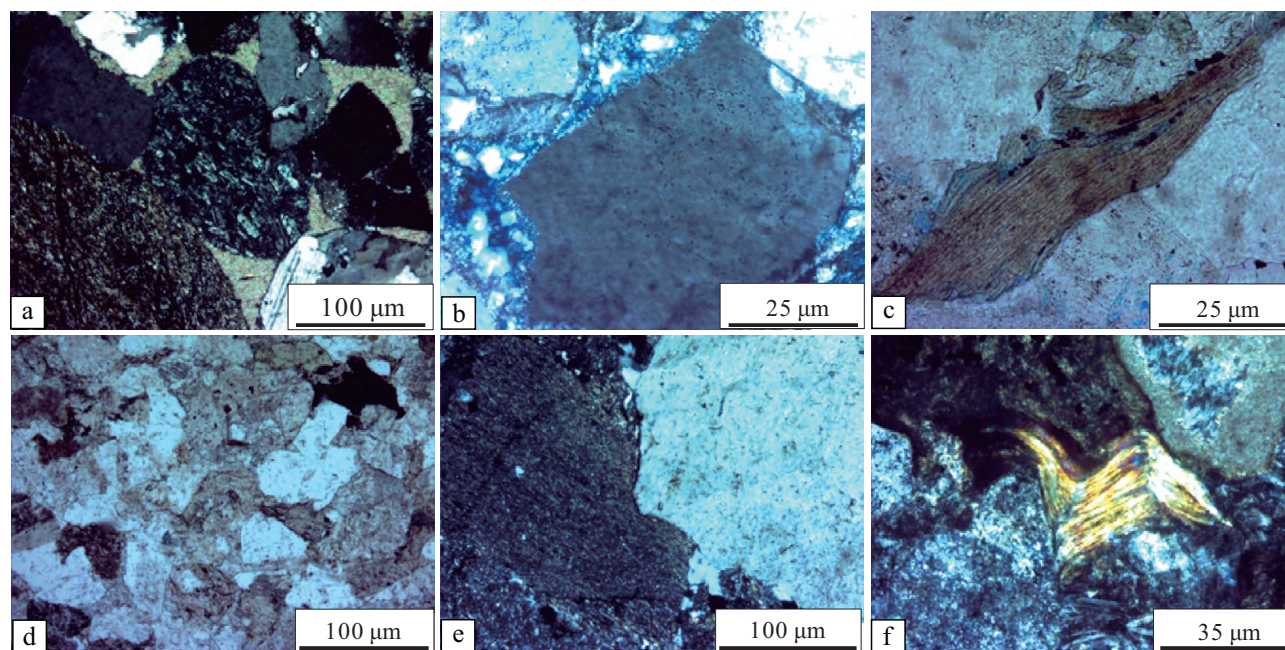
今物性接近,但含油级别却存在很大差异。由此可见,静态的储集层评价方法在该地区无法应用,若对储集层进行评价,会产生完全错误的结论。另一方面,对于面积较大的地区而言,1套储集层的含油气性除了受储集层物性影响,还与其他多种成藏因素有关;而同一油田一般具有相似的油气来源、运移通道、烃类充注动力和保存条件,其含油气性往往与成藏期储集层物性密切相关,但常常与现今储集层物性不一致。

结合上述实际勘探问题,作者认为已有的静态储集层评价方法只能表征现今的储集层特征,由于没有综合考虑成藏过程与砂岩储集层演化过程以及二者的耦合关系,从而会得出错误的结论,进而对油气勘探产生误导。因此,现有的静态储集层评价体系已不完全适用。在这一情况下,需要将砂岩储集层演化特征与油气成藏过程结合起来,在明确关键成藏期的基础上,恢复成藏期砂岩储集层的古物性,进而探讨成藏期油气充注进入砂岩储集层后,储集层发生的一系列复杂成岩演化过程,即需要对储集层进行动态认识和评价。

2.2 砂岩孔隙度在埋藏期内演化特征

2.2.1 埋藏过程中一直存在压实作用

随着埋藏深度的增加,砂岩孔隙度也会逐渐减小。现有研究普遍认为,在浅埋藏阶段(深度<2500 m),快速的机械压实作用是导致砂岩孔隙骤减的主要原因(Powers, 1967; Selley, 1978),而到了深层压实作用就非常弱了,基本上可以忽略不计。然而,深部地层也存在压实的证据。作者对松辽盆地徐家围子地区不同深度段的岩石薄片进行了观察,对压实作用的特征进行了分析,发现不同深度均存在压实作用,压实作用的程度和表现形式在不同深度段存在差异,总体上随着埋藏深度的不断增加,矿物颗粒的接触类型从点接触、线接触逐渐过渡为凹凸接触,矿物颗粒的变形破裂程度从无变形和破裂逐渐转变为以变形和破裂为主,反映出压实程度逐渐从弱到强的变化趋势(图1)。进一步结合 Houseknecht 图版对松辽盆地徐家围子地区深部沙河子组致密砂岩的压实作用进行分析,发现岩屑砂砾岩多数样本在图的左下区域,而少数在右上区域(图2),说明压实作用导致约50%~80%的初



a—宋深4井, 2770.71 m, 碳酸盐胶结物镶嵌分布, 弱压实, 正交偏光; b—宋深4井, 2772.21 m, 黏土薄膜状胶结, 弱压实, 正交偏光; c—徐探1井, 3123.7 m, 强压实, 云母压断, 矿物颗粒间主要为线接触, 局部出现凹凸接触, 单偏光; d—芳深8井, 3145 m, 强压实, 颗粒凹凸接触, 孔隙不发育, 正交偏光; e—徐深1井, 3820.12 m, 强压实, 颗粒凹凸接触, 正交偏光; f—徐深15井, 4352.86 m, 强压实, 云母压弯变形, 正交偏光

图1 松辽盆地徐家围子地区深部砂岩储集层压实作用特征

Fig. 1 Compaction characteristics of deep sandstone reservoirs in Xujiaweizi area, Songliao Basin

始孔隙度损失，而胶结作用则导致了约为 10% ~ 40% 的初始孔隙度损失。表明压实作用和胶结作用都是储集层致密的重要因素，但压实作用是深部储集层致密化的主控因素，揭示了埋藏过程中压实作用一直存在。此外，前人运用已经致密的砂岩样品，模拟实际地层情况对样品进行压实，结果表明砂岩样品的孔隙度仍可以减少 2% ~ 4%（操应长等，2011），也证实深埋地层的砂岩压实作用依然存在。

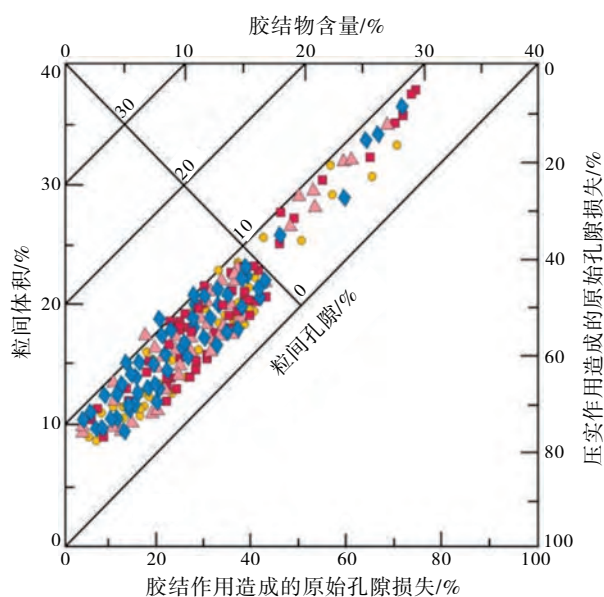


图 2 松辽盆地徐家围子砂岩基于岩石现今表观体积的压实与胶结作用 Houseknecht 图版

Fig. 2 Crossplots of compaction versus cementation in Houseknecht pattern of Xujiaweizi sandstone in Songliao Basin

2.2.2 油气成藏后砂岩储集层会继续减孔

砂岩储集层在油气充注成藏后仍要经历长时间的复杂演化，才能表现为现今的特征。油气成藏后砂岩储集层的演化中成岩作用的影响是关键，而油气侵位对成岩作用的影响一直存在争议，主要表现在 2 个方面。一是认为油气侵位会使胶结作用受到抑制，从而延缓了砂岩储集层孔隙的减小。如袁东山等（2005）通过对东营凹陷古近系碳酸盐矿物进行镜下观测与统计分析，发现油层中方解石、白云石含量一般比水层低，认为原油充注导致碳酸盐矿物的沉淀作用受到抑制；孟元林等（2010）通过研究认为油气侵位对松辽盆地中浅层成岩作用和孔隙度衰减起到抑制作用；二是认为油气充注后，不会完全抑制自生矿物的生长，反而会形成铁方解石、

铁白云石和绿泥石。如史基安等（2003）研究发现油气充注后砂岩储集层仍会发育晚期的碳酸盐胶结，从而加速了储集层孔隙的减小。

为了研究油气成藏后砂岩储集层的孔隙演化特征，作者对中国东部松辽盆地徐家围子地区沙河子组砂岩储集层成岩序列进行了分析，发现当油气充注之后砂岩仍可以发生石英和碳酸盐矿物的胶结作用，且镜下荧光分析发现石英次生加大边与烃类包裹体存在以下 3 种共生关系：石英次生加大边与石英颗粒之间可见残留沥青现象、石英次生加大边内部可见烃类包裹体、石英次生加大同时夹残留沥青和烃类包裹体。这充分说明了油气进入砂岩储集层成藏后，胶结作用依然会发生，即砂岩储集层成藏后在压实作用和胶结作用的共同影响下，孔隙度继续保持减小的趋势。

2.2.3 砂岩溶蚀作用符合化学反应动力学原理

溶蚀作用是在成岩环境中，砂岩中的碎屑颗粒、杂基、胶结物和交代矿物与孔隙流体发生化学反应，发生不同程度的溶解，形成次生孔隙，从而明显地提升砂岩储集层物性的作用（孟元林等，2011）。作者对松辽盆地徐家围子地区沙河子组砂岩溶蚀增孔作用进行了研究，发现砂岩的增孔主要来自于有机酸的次生溶蚀作用，而有机酸的浓度最高时对应的地层温度大概 70 ~ 120 °C，处于烃源岩低成熟—成熟阶段，这一时期，更多的有机质（暗色泥岩中腐泥型有机质）成熟，随着流体 pH 值进一步降低，大量易溶铝硅酸盐组分（如长石、岩屑等）溶解开始大规模发生，对应着早—中成岩阶段。当地温低于 70 °C 时，有机酸无法大量生成，次生溶孔发育可忽略不计；当地温超过 120 °C 时，受地层中酸浓度逐渐降低和油气侵位发生的影响，溶蚀孔隙的发育变缓。由此可见，砂岩储集层溶蚀作用的发生与有机酸的浓度密切相关，符合化学反应动力学原理。当温度低于或高于溶蚀作用发生的温度窗口时，溶蚀作用造成的孔隙度增加值将大大降低。

2.2.4 典型深层砂岩孔隙度演化特征

依据成岩作用对储集层孔隙度效应的不同，可将其划分为使孔隙度增大的建设性成岩作用和使孔隙度减小的破坏性成岩作用，其中破坏性成岩作用主要包括压实作用、胶结作用、交代作用，建设性成岩作用主要为溶解作用。作者分别对东营凹陷牛

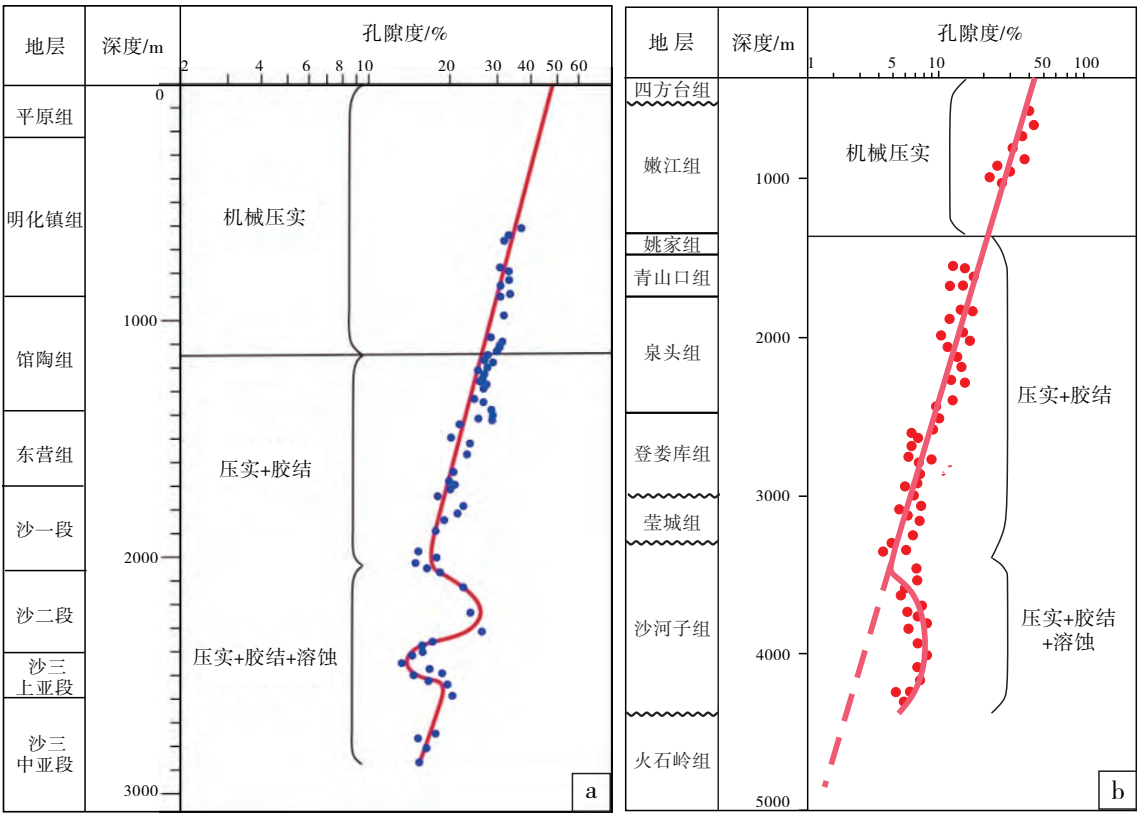
庄洼陷牛 6 井以及松辽盆地徐家围子断陷达深 16 井砂岩现今孔隙度剖面进行了分析,发现砂岩孔隙度演化具有分段特征,整体上砂岩孔隙度随埋深增加呈正比例减小(图 3)。在浅部主要为机械压实作用使砂岩储集层孔隙度呈线性减小,在中浅层胶结作用开始出现并与压实作用一同致使砂岩储集层孔隙度线性减小,在中深层因为有机酸的作用使可溶矿物溶解,砂岩储集层孔隙度增大,孔隙度演化偏离之前的线性减小趋势,直到溶解作用消失,砂岩储集层在压实作用和胶结作用的共同影响下才再次表现为孔隙度减小趋势。从图 3 中可知,深层砂岩储集层减孔趋势与中浅层砂岩减孔趋势平行,表现出深层与浅层减孔趋势一致的特点。

2.3 砂岩储集层烃类充注存在临界物性

2.3.1 致密砂岩储集层现今物性含烃下限普遍较低

和常规砂岩储集层相比,致密砂岩储集层具有较差的物性特征。为了厘清致密砂岩储集层物性与含烃关系,研究中基于试油和录井资料,分别对东营凹陷牛庄洼陷沙三中亚段砂岩储集层,以及松辽

盆地徐家围子断陷沙河子组储集层的含烃下限进行了系统分析,试油数据分析结果显示,牛庄洼陷西部沙三中亚段现今储集层含油孔隙度下限为 3.5%,渗透率下限为 $0.09 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,即低于物性下限值,试油结果显示为干层(图 4-a)。录井分析结果也表现为相似的低孔渗现象,揭示了现今储集层含油孔隙度下限为 3.5%,渗透率下限为 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图 4-b)。综合试油和录井数据,将牛庄洼陷西部沙三中亚段现今储集层含油下限确定为孔隙度 3.5%,渗透率为 $0.095 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。徐家围子断陷沙河子组储集层试气资料统计结果表明:气层孔隙度主要分布于 1%~10%,渗透率主要分布于 $(0.01 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;干层孔隙度主要分布于 0%~10%,渗透率分布于 $(0.01 \sim 0.1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,干层渗透率普遍低于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,储集层孔渗相关性差,而且气层物性明显好于干层。因此,通过试气资料分析得到的沙河子组砂岩含气孔隙度下限为 1.8%,含气渗透率下限为 $0.04 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图 5-a),另一方面,徐家围子断陷沙河子组储集层录井资料统计结果表明:含气层的孔隙度主要分布



a—东营凹陷牛庄洼陷 N6 井; b—徐家围子断陷达深 16 井

图 3 中国东部断陷盆地典型单井现今砂岩孔隙度与深度关系

Fig. 3 Relation of sandstone present porosity and burial depth of typical wells in rifted basins, eastern China

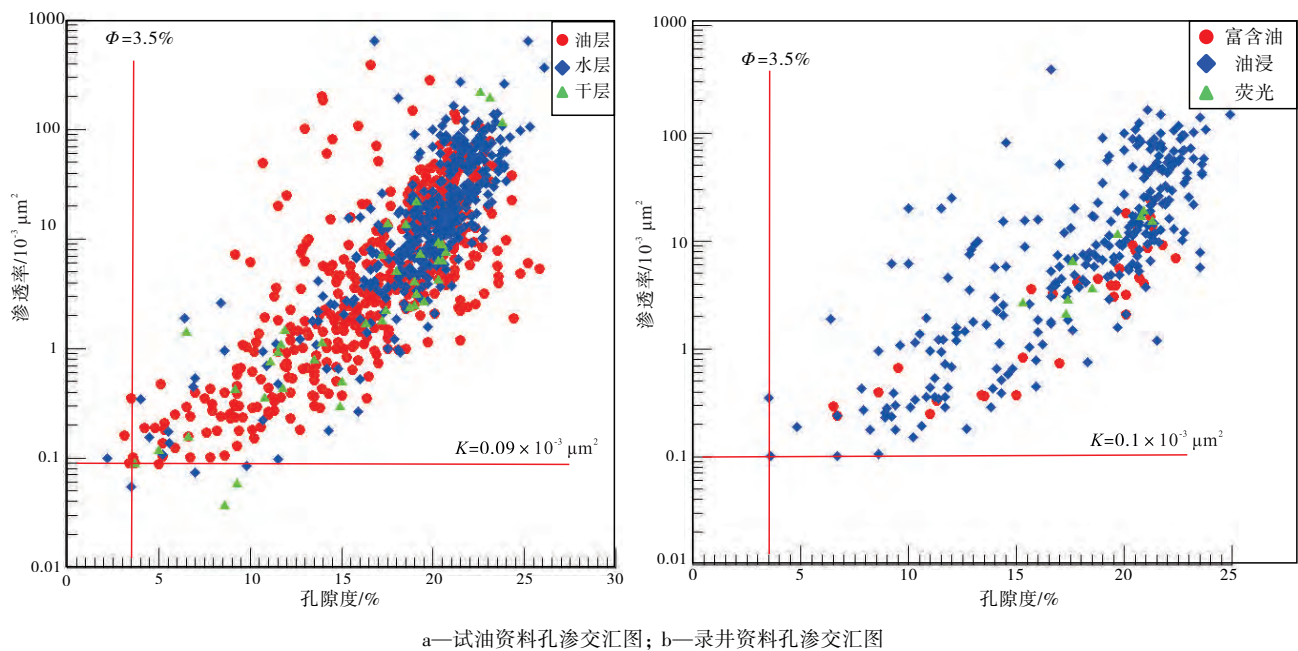


图 4 东营凹陷牛庄洼陷沙三中亚段砂岩储集层现今物性含烃下限分析

Fig. 4 Lower limit of present oil-gas physical properties of Es₃² sandstone reservoir of the Middle Sub-member of Member 3 of Shahejie Formation in Niuzhuang area, Dongying sag

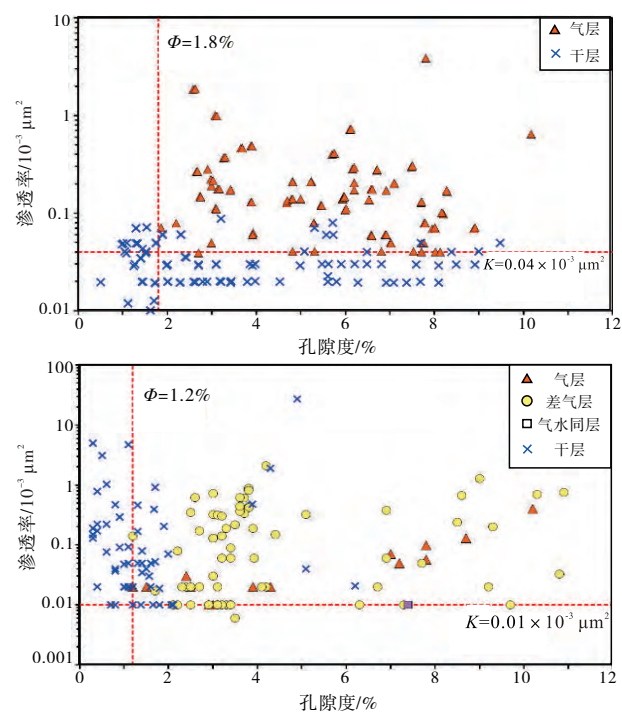


图 5 松辽盆地徐家围子地区沙河子组砂岩储集层现今物性含烃下限分析

Fig. 5 Lower limit of present oil-gas physical properties of the Shahezi Formation sandstone reservoir in Xujiaweizi area, Songliao Basin

在 1% ~ 10%，渗透率主要分布在 $(0.01 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ；干层的孔隙度主要分布在 0% ~ 2%，渗透率分布在 $(0.01 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，通过录井资料分析得到的沙河子组砂岩含气孔隙度下限为 1.2%，含气渗透率下限为 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (图 5-b)。综合试气和录井资料统计分析，确定出徐家围子断陷沙河子组储集层现今的含气孔隙度下限为 1.5%，渗透率下限为 $0.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。上述分析结果显示致密砂岩储集层现今物性含烃下限普遍较低。

2.3.2 成藏期砂岩含烃下限需要恢复

前文研究表明，现今砂岩储集层物性的好坏不能完全等同于成藏期砂岩储集层的物性。因此，要想对储集层作出准确的评价，必须要对成藏期砂岩储集层的物性进行恢复。作者采用刘震等 (2012) 提出的孔隙度压实剖面回推法，结合地层的埋藏史和热史资料，通过正常压实剖面来确定储集层成藏期以来的平均孔隙度变化量，然后结合现今含烃物性下限得到最终的成藏期临界物性。下面以东营凹陷牛庄洼陷沙三中亚段砂岩和松辽盆地徐家围子断陷沙河子组砂岩为例，介绍成藏期砂岩含烃下限的恢复情况。

研究中选取了东营凹陷牛庄洼陷 5 口代表井恢

复成藏期砂岩储集层的临界物性。结果表明,成藏期到最大埋深期,砂岩储集层继续接受沉积压实作用,5口代表井砂岩储集层孔隙度减孔量平均值为10.4%,即现今的孔隙度为最大埋深期的孔隙度,所以成藏期充注临界物性为现今含油下限+充注后期孔隙度变化量。因此,牛庄洼陷西部沙三中亚段成藏期砂岩储集层临界物性表示为 $3.5\%+10.4\%=13.9\%$,恢复后的孔隙度值即为成藏期砂岩含烃下限值。

松辽盆地徐家围子地区3口典型井的目的层砂岩分析结果显示,储集层成藏期以来的平均孔隙度减小值为6.5%,再加上现今的含气孔隙度下限1.5%,最终得到松辽盆地徐家围子断陷沙河子组储集层天然气成藏临界孔隙度为8.0%,即成藏期砂岩含烃下限值。

2.3.3 不同沉积相砂岩临界孔隙度存在差异

对中国东部断陷盆地致密砂岩油气藏分布特征进行了分析,发现多种沉积相均可以形成致密油气藏。以松辽盆地致密油藏为例,其北部的曲流河点坝、网状河砂体、分流河道砂体、决口河道砂体等多个沉积相类型都可以形成致密储集层,但不同沉积相砂岩的物性特征存在差异,总体上具有曲流河点坝、网状河砂体、分流河道砂体物性相对较好,而决口河道砂体和决口扇砂体物性较差的特征。因此,不同沉积相砂体临界孔隙度最终也各不相同。作者重点分析了松辽盆地长岭断陷深层不同沉积相致密砂岩的临界孔隙度特征,结果表明不同沉积相类型成藏期储集层的临界孔隙度存在差异,且不同构造带同一沉积相类型成藏期储集层的临界孔隙度也不相同。试油和录井资料综合显示,松辽盆地长岭断陷深层现今砂岩储集层的孔隙度下限为2.7%,深洼带沉积相类型为辫状河河道,3口代表井的研究结果显示,从成藏期到最大埋深期,砂岩孔隙度平均减小了5.4%,因此,深洼带成藏期辫状河河道砂岩储集层的临界孔隙度为8.1%。斜坡带沉积相类型为辫状河河漫滩,从成藏期到最大埋深期,砂岩孔隙度平均减小了6.5%,则深洼带成藏期辫状河河漫滩砂岩储集层的临界孔隙度为9.2%。凸起带沉积相类型虽然也为辫状河河道,但2口代表井的研究结果显示,从成藏期到最大埋深期,砂岩孔隙度平均值减小了5.2%,因此,凸起带成藏期辫状河河道砂岩储集层的临界孔隙度为

7.9%。研究结果揭示了沉积相类型以及埋藏差异性对于成藏期砂岩临界孔隙度的影响。

2.4 致密砂岩储集层动态评价原理

2.4.1 砂岩储集层过剩孔隙度概念

油气能否充注,与成藏期储集层的物性密切相关,即成藏期储集层的孔隙度必须大于临界孔隙度,油气才能有效充注。对中国东部断陷盆地致密砂岩储集层成藏期孔隙度与储集层试油结果进行了统计分析,发现成藏期储集层的孔隙度越大,对应的储集层产量往往越高。为了更加直观描述成藏期储集层孔隙度与现今产油量的关系,作者提出了砂岩储集层过剩孔隙度的概念,表示如下:

$$\Delta\varphi = \varphi_{\text{成藏期}} - \varphi_{\text{临界}}$$

式中, $\Delta\varphi$ 为过剩孔隙度,其值是成藏期孔隙度与临界储集层孔隙度的差值, $\varphi_{\text{成藏期}}$ 为砂岩储集层成藏期实际的孔隙度值, $\varphi_{\text{临界}}$ 为砂岩储集层成藏期孔隙度下限值。

利用成藏期过剩孔隙度 $\Delta\varphi$ 就可以对砂岩储集层进行动态评价,当 $\Delta\varphi>0$ 时,油气就可以有效充注到砂岩储集层,且 $\Delta\varphi$ 值越大,其他条件相同情况下,油气产量就越高;当 $\Delta\varphi<0$,油气就不能充注到砂岩储集层,从而无法形成油气藏。

2.4.2 砂岩孔隙度演化过程与油气成藏过程关系

油气藏的形成取决于生、储、盖、圈、运、保以及各成藏要素在时空演化过程中的配置关系,是个动态的过程。作者从致密砂岩动态成藏的角度出发,以中国东部松辽盆地致密砂岩为例,对其动态成藏过程进行了解剖,通过恢复油气成藏过程中的“九史”演化过程,定量重建了致密砂岩油气成藏的过程,进而阐明了砂岩孔隙演化与油气成藏之间的关系。作者主要以松辽盆地北部达深16井为例进行说明(图6)。

松辽盆地徐家围子断陷烃源岩主要为沙河子组的暗色泥岩和煤层。沉积初期至早白垩世晚期,地层快速埋藏至2000 m,此时,烃源岩成熟度较低, R_0 普遍小于0.5%,此阶段有机酸大量产生,有利于次生孔隙的产生;之后随着埋深的不断增大,烃源岩热演化明显变快,在白垩纪末埋深达到最大,因此,该阶段是重要的生烃期和充注期;古近系以来,生烃作用普遍停止,是油气的重要调整期。总体来说,徐家围子断陷烃源岩早期快速深埋,而且

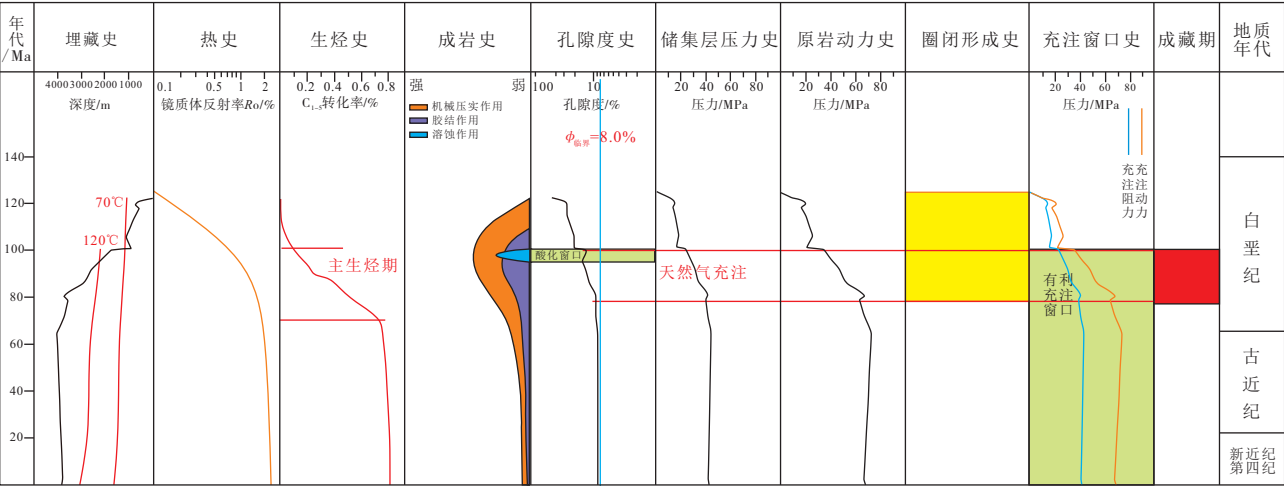


图 6 松辽盆地达深 16 井沙河子组 (3670.6~3693.2 m) 砂岩气藏动态解剖九史图

Fig. 6 Nine history diagram of dynamic anatomy of sandstone gas reservoirs in the Shahezi Formation (3670.6~3693.2 m) of Well Dashen 16 in Songliao Basin

地温梯度高，导致烃源岩生烃较早，持续时间较长。因此具有早期生烃、持续生烃的特点。

徐家围子断陷沙河子组储集层类型主要为异常致密的砂砾岩储集层，沉积初期的孔隙度约为 45%，沉积初期至晚白垩世早期储集层快速减孔，该阶段地层快速埋藏至 2500 m，受早期快速压实和中后期胶结作用影响，快速减孔，同时受有机酸溶蚀作用的影响有一定的次生孔隙产生，增孔量约为 2%~5%，综合表现为快速减孔的特点，该过程减孔量可达 30%~35%，当该阶段结束时储集层储集层减孔至 9.8%，基本已致密；晚白垩世早期至现今以来，整体呈弱减孔趋势，地层主要受胶结和压实作用影响，减孔速率减小，古近系以来，整个断陷差异抬升剥蚀，压实、胶结作用持续发生，故该阶段整体仍处于减孔阶段，减孔至现今的 6.5%。总体来说，徐家围子断陷沙河子组储集层在泉头组沉积时期已基本致密，沙河子组气藏成藏初期储集层还未致密，具有边致密、边成藏的特点。

2.5 东部深层低孔渗—致密砂岩具有较大勘探潜力

现有储集层评价方法只是针对现今砂岩储集层特征进行评价，是一种“静态”的储集层评价方法，忽视了砂岩储集层成藏后继续演化的特点，不能反映成藏期储集层的特征，因此现有储集层评价实际上与油气成藏无关，故不能达到对

储集层进行评价的真正目的。从这一角度出发，东部深层低孔渗—致密砂岩储集层仍具有较大的勘探潜力，主要体现在以下 3 个方面：一是过去评价较低的深部层系仍然具有含烃性。很多深部储集层现今表现为低孔低渗、甚至特低孔特低渗的特征，这些结论往往是常规评价方法得出的结论，再加上钻探效果不理想，很多深部层系没有获得重要发现。动态储集层评价方法在研究较深部层系时，能够发现潜在的有利储集层，从而获得油气显示。二是过去评价较低的区块仍然需要重新认识，可能重新作为有利区带。由于动态储集层评价方法与常规静态方法不同，所以那些被静态方法否定而被动态评价方法认可的区带很可能重新让勘探家们重视起来，从这个意义上讲，储集层动态评价方法是部分老井复查的理论依据。三是过去评价没有出油的洼槽带仍然可能富集油气。常规的储集层评价方法更多的是对现今储集层特征进行的评价，评价的结果实际和油气成藏无关，不能作为衡量洼槽带是否含油的依据，而作者介绍的储集层动态评价方法，综合考虑了砂岩储集层成藏过程与储集层演化过程，是对成藏期储集层进行的含油气评价，评价结果更加符合油气成藏规律。

综合上述多方面的分析，认为采用储集层动态评价方法对东部深层低孔渗—致密砂岩储集层进行再次评价十分必要，新的评价结果将揭示出东部深

层低孔渗—致密砂岩极大的勘探潜力。

3 陡坡带深层大型斜向扇三角洲砂砾岩体具有极大的勘探潜力

近年来砂砾岩体油气勘探除了在济阳拗陷和泌阳凹陷取得重大发现外,在辽河陈家洼陷、冀中束鹿凹陷、廊固凹陷、晋县凹陷和松辽盆地的深部、准噶尔盆地玛湖凹陷、渤海湾盆地渤中拗陷、二连盆地乌里雅斯太凹陷也相继有所突破,预示着砂砾岩体油气藏勘探即将进入一个新阶段(胡潇等, 2020; 王有智等, 2020; 胡鑫等, 2021)。作者运用岩心、测井、地震资料对中国东部南堡凹陷柳赞地区、车镇凹陷的砂砾岩进行了研究,发现断陷盆地早期陡坡带发育大型斜向沉积物源的证据,该发现丰富了断陷湖盆陡坡带储集体的类型,指出了断陷湖盆陡坡带深层砂砾岩储集体具有巨大的油气勘探潜力。

3.1 东部深层砂砾岩勘探面临的主要问题

随着勘探不断深入,目的层系逐渐向深部转移,其中陡坡带经勘探被证明是重要的油气富集带。前人研究认为,断陷湖盆陡坡带沉积物源方向以短轴方向逐步演化为短轴和长轴等多个方向(陈广坡等, 2010; 侯冠群等, 2016; Henstra *et al.*, 2017; Cao *et al.*, 2018),并在陡坡带形成不同的沉积充填样式,如在初始裂陷期,沉积充填样式主要以冲积扇、近岸水下扇为主,深陷扩张期主要以近岸水下扇、湖底扇、滑塌浊积扇为主,抬升收缩期主要以近岸水下扇,扇三角洲和冲积扇为主。扇体大多沿短轴方向汇入汇水盆地,并垂直于边界或次级断层。目前,已经发现在断陷早期远离边界断层边缘的盆内陡坡带沉积超过 2000 m 厚的富砾沉积物,研究认为这些巨厚的沉积物是碎屑物沿短轴方向进入陡坡带形成垂直于边界断层的扇体,并解释为近岸水下扇。

然而,随着勘探重新聚焦于深层领域,主要面临以下 2 个具体的问题:(1)前人研究认为,断陷湖盆陡坡带物源及其储集体主要来源于短轴方向,对于是否存在其他方向的来源很少研究;(2)前人在陡坡带虽已发现优质储集体,但对于储集体的成因类型研究比较少,无法指导勘探。

针对上述问题,作者以中国东部南堡凹陷柳赞

地区和车镇凹陷的深层砂砾岩为例,讨论断陷湖盆早期物源方向和储集体类型,为东部断陷盆地陡坡带下一步勘探提供新的认识和模式。

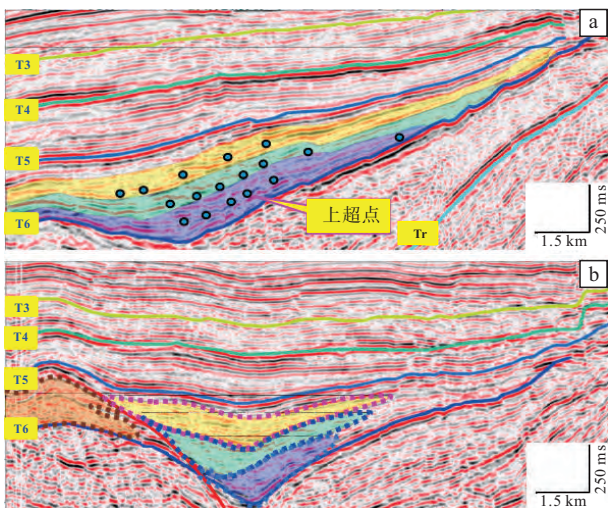
3.2 勘探思路转变及大型斜向沉积物源的发现

目前,关于断陷盆地陡坡带物源方向的研究,比较一致的观点还是认为在断陷早期主要发育短轴体系和长轴体系,长轴体系主要发育在沉积盆地的边缘地区,由水系携带大量细碎屑物质进入汇水盆地形成富砂的冲积扇或辫状河/扇三角洲,扇体大多平行于边界断层发育;短轴体系主要发育在沉积盆地内部,由季节性洪水携带大量粗碎屑物质沿断层上的古冲沟进入陡坡带,形成富砾的近岸水下扇,扇体垂直于边界断层发育,尤其是在断陷早期,多期的近岸水下扇厚度累计可达 1000 余米。然而,这种现有模式也存在一些不足:首先,陆相湖盆一般具多物源的特征,现在采用单一的源-汇模式来解释断陷早期盆内陡坡带超厚层的砂砾岩难以符合实际资料;其次,近岸水下扇被解释成季节性洪水成因,其主要与气候的变化密切相关,储集体物性较差,储集体规模较小,油气勘探潜力有限。

前人已对南堡凹陷柳赞地区、车镇凹陷目的层的砂砾岩体展开了研究,结果显示,南堡凹陷柳赞地区沙三段整体仅发育北东向物源形成的短轴扇三角洲(张锐等, 2012),车镇凹陷沙三下亚段仅发育垂直于边界断层的近岸水下扇(鲜本忠等, 2007)。作者根据三维地震数据精细解释成果,发现大型斜交前积—充填地震相组合,按照地震相分布规律,并结合岩相组合和电测曲线特征,讨论了上述典型地区发育斜交于边界断层的大型扇三角洲砂砾岩储集体发育模式。

3.2.1 大型前积—充填地震相及地震属性特征揭示陡坡带发育斜向扇三角洲

南堡凹陷柳赞地区北西—南东向地震剖面,车镇凹陷北东—南西向地震剖面中均识别出大型斜交前积地震相(图 7-a)。前积体具有中—强振幅、中—高频率、中等连续的特点。内部反射轴呈相对高角度的切线斜交的前积结构,顶部缺失顶积层,下部表现出上超—一整—关系。此外,前积体的延展方向也说明了沉积物供给方向。在垂直于前积体方向的地震剖面中均识别出充填地震相(图 7-b)。内部反射特征表现出中等振幅、中—高频率、中等



a—北东—南西向顺物源地震剖面；b—北西—南东向垂直物源地震剖面

图 7 济阳拗陷车镇凹陷陡坡带西段地震剖面

Fig. 7 Seismic profiles of western section of steep slope zone in Chezhen sag, Jiyang Depression

连续的特点。可见双向上超，为河道充填的现象。因此，大型斜交前积—充填地震相组合指示了近物源和强水动力条件下扇三角洲发育。进一步的，对上述 2 个研究区的 RMS 地震属性分布特征进行了分析，发现南堡凹陷柳赞地区在沙三三亚段沉积时期，整体可识别出 3 个物源方向—西北部、北部和东部，砂体平面展布特征与物源方向存在明显的对应关系，在西北部物源表现为大规模的强振幅异常，且在空间上表现出北西—南东向展布，外形呈不规则朵叶型，成片连续分布，表明存在大规模的北西—南东向砂体沉积；东部表现出小规模的强振幅异常，并且在局部连片发育，空间上表现出北东—南西向展布，表明存在小规模的南东—北西向的砂体沉积；北部紧邻边界断层处表现出小规模的中等—强振幅，表明发育小规模砂体沉积。车镇凹陷洼槽带表现出大规模的强振幅的特征(图 8)，平面上表现出北东—南西向展布，外形整体呈舌状体，并在 C15 井区分叉，表明存在大规模的北东—南西向的砂体沉积。在 2 套砂体的中间地带，发育条带状的弱振幅，说明在 2 套砂体之间存在泥岩分隔带。

综上所述，大型斜交前积—充填地震相组合和地震属性平面分布特征，揭示了南堡凹陷柳赞地区、车镇凹陷均发育大型斜交于边界断层的斜向扇三角洲。

3.2.2 岩心沉积相分析表明沉积物具有牵引流特征
研究中基于岩心特征，在南堡凹陷柳赞构造西

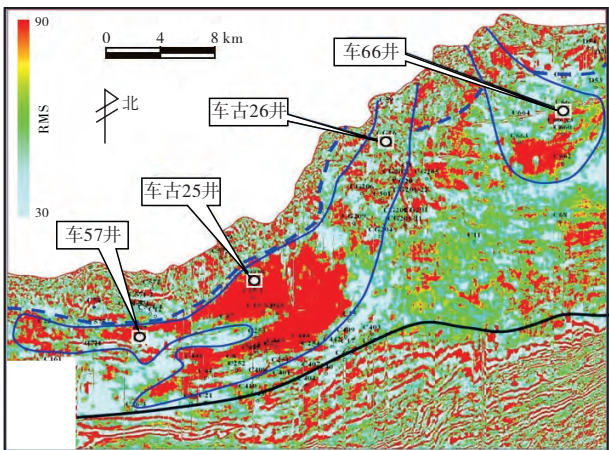


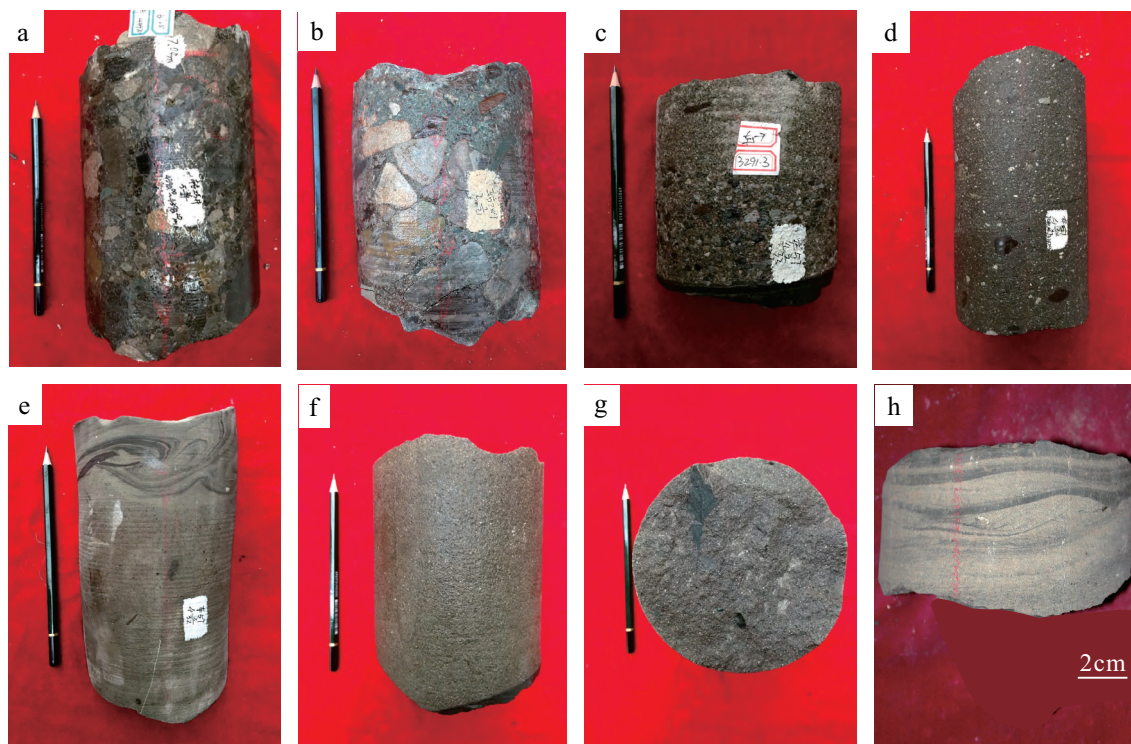
图 8 济阳拗陷车震凹陷车西地区沙三下亚段 RMS 属性特征

Fig. 8 Seismic RMS features of the Lower Sub-member of Member 3 of Shahejie Formation in Chexi area, Chezhen sag, Jiyang Depression

北方向的沙三三亚段中，识别出典型的牵引流特征，主要包括块状砾岩相、叠瓦状砾岩相、叠瓦状含砾砂岩相、槽状层理粉砂岩相、块状中砂岩相以及块状粉砂岩相；在车镇凹陷沙三下亚段，识别出颗粒支撑块状中砾岩相、颗粒支撑叠瓦状中砾岩相、颗粒支撑叠瓦状细砾岩相、叠瓦状含砾砂岩相、变形层理含砾砂岩相、块状含砾砂岩相和小型槽状交错层理砂岩相(图 9)。

3.2.3 岩相组合与电测曲线证实斜向扇体为扇三角洲

对南堡凹陷柳赞地区、车镇凹陷岩相组合和测井曲线特征进行了研究，结果表明南堡凹陷柳赞地区可识别出扇三角洲前缘支流间湾、水下分流河道和河口坝沉积微相(图 10)。其中支流间湾整体表现为块状，内部岩性以含砾砂岩和粗砂岩为主，指示砂质碎屑流成因，电阻率曲线表现为叠加的高幅箱形特征，因此代表扇三角洲前缘支流间湾沉积；水下分流河道整体表现为下粗上细的正韵律特征，内部岩性主要以含砾砂岩和粗砂岩为主，下部可见砾石定向排列特征，底部发育冲刷面，指示牵引流沉积，电阻率曲线表现为高幅钟型特征，因此指示扇三角洲前缘水下分流河道沉积；河口坝整体表现为下细上粗的反韵律特征，纵向可进一步分为 2 期，第 1 期由粗砂岩向含砾砂岩中过渡，第 2 期为中砂岩向粗砂岩中过渡，砾石可见定向排列特征，指示牵引流沉积，伽马曲线表现为漏斗型，电阻率曲线则为中幅微齿状，因此代表扇三角洲前缘河口坝沉积环境。



a—车古 25 井, 4397 m, 杂色中砾岩, 砾石分选差, 块状结构, 无层理; b—车古 207 井, 2985.8 m, 灰绿色中砾岩, 砾石分选差, 叠瓦状构造; c—车 57 井, 3291.3 m, 细砾岩, 正韵律, 叠瓦状构造; d—车 57 井, 3294.5 m, 含砾粗砂岩, 块状无层理, 可见砾石定向排列; e—车 57 井, 3290.2 m, 中砂岩, 揉皱变形层理; f—车 57 井, 3559 m, 粗砂岩, 块状结构, 无层理; g—车 57 井, 3559 m, 为 f 的平面特征, 可见漂浮状的泥岩撕裂屑和植物碎片; h—车 57 井, 3196.09 m, 浅黄色细砂岩, 发育小型槽状交错层理

图 9 济阳坳陷车西地区沙三下亚段岩心特征

Fig. 9 Cores characteristics of the Lower Sub-member of Member 3 of Shahejie Formation in Chexi area, Jiyang Depression

车镇凹陷发育扇三角洲平原分流河道微相与扇三角洲前缘河口坝和席状砂沉积微相。其中分流河道内部岩性主要以灰绿色中砾岩和细砾岩为主, 可见砾石定向排列, 底部具冲刷面, 结构成熟度高, 整体表现为下粗上细的正韵律特征, 灰绿色反映弱氧化的沉积环境, 电阻率曲线表现为 2 期叠加的高幅钟型, 因此反映扇三角洲平原分流河道沉积。河口坝内部岩性主要以中砂岩和粗砂岩为主, 整体表现为下细上粗的反韵律特征, 韵律中段发育小型槽状交错层理, 伽马曲线表现为漏斗型, 因此代表扇三角洲前缘河口坝沉积环境。而席状砂岩性以细砂岩以及细粉砂岩为主, 并发育有泥质夹层, 整体表现为块状构造, 无韵律特征, 分布广而薄, 可见变形层理和泥岩撕裂屑等, 说明存在滑塌作用, 伽马曲线表现为中幅指状, 结合整体的沉积环境, 反映为扇三角洲前缘席状砂沉积环境。

3.2.4 斜向大型扇三角洲展布特征

基于岩相及其组合、测井曲线特征、地震相特

征等资料, 阐明了南堡凹陷柳赞地区、车镇凹陷陡坡带斜向大型扇三角洲展布特征。南堡凹陷柳赞地区沙三三下亚段沉积时期, 发育 3 个方向的物源体系, 其中西北部物源为主要的沉积物供给来源, 形成了斜交于边界断层的斜向扇三角洲(图 11-a), 扇体规模大, 延伸距离远, 向洼槽带推进, 在平面上呈席状展布, 表现为不规则朵体。

车西地区沙三下亚段主要发育斜交于边界断层的北东—南西向展布的大型扇三角洲(图 11-b)。空间上, 扇体以低角度斜交于边界断层, 扇体呈舌状, 向洼槽带延伸距离远。时间上, 期次特征明显, 自下而上发育 3 期, 扇体规模逐步扩大, 反映了北东方向为主要的沉积物供给方向。在研究区紧邻边界断层的位置, 发育垂直于边界断层展布的近岸水下扇, 扇体多悬挂或紧邻于边界断层, 呈“裙褶状”分布, 扇体规模小, 呈楔状。空间上近岸水下扇与扇三角洲表现出接触或相邻不接触的关系。不接触的地带通常为湖泊相充填。




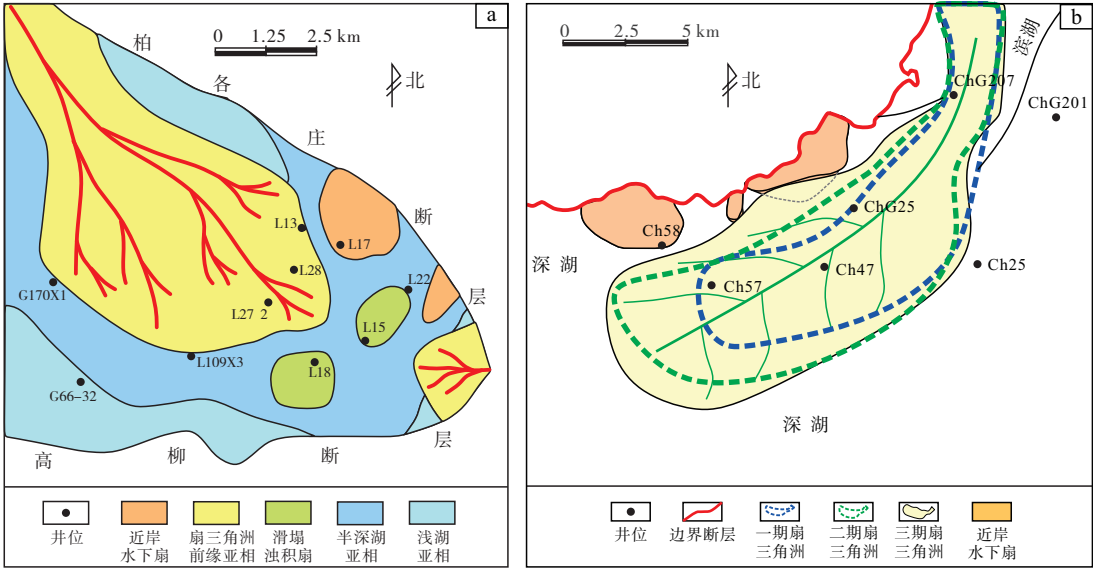
序号	层位	测井曲线	深度/m	岩性剖面	测井曲线	岩心照片	沉积微相	沉积亚相	沉积相
1	$E_{s_3}^3$	GR/API 16 31	3110 3120	L26X1井	$R_{4.0}/\Omega \cdot m$ 2 22	 砾质砂岩（左）和中砂岩（右），块状结构，无层理	支流间湾	扇三角洲前缘	扇三角洲
2	$E_{s_3}^3$	GR/API 67 99	3250 3260	L13-1井	$R_{4.0}/\Omega \cdot m$ 1 102	 正韵律序列，底部为杂色砾岩，砾石具定向排列特征，上部过渡为含砾砂岩	水下分流河道	扇三角洲前缘	扇三角洲
3	$E_{s_3}^3$	GR/API 6.5 11.7	3780 3790	L9井	$L_{1.3D}/\Omega \cdot m$ 2 35	 灰白色含砾粗砂岩，磨圆、分选好	河口坝	扇三角洲前缘	扇三角洲

图 10 南堡凹陷柳赞地区沙三三亚段 ($E_{s_3}^3$) 沉积微相特征

Fig. 10 Characteristics of sedimentary microfacies of the Sub-member 3 of Member 3 of Shahejie Formation in Liuzan area, Nanpu sag



a—南堡凹陷柳赞地区沙三三亚段沉积相展布特征；b—车镇凹陷车西地区沙三下亚段沉积相展布特征

图 11 中国东部 2 个断陷湖盆陡坡带沉积相分布

Fig. 11 Distribution of sedimentary facies in steep slope zones of two rifted lacustrine basins in eastern China

3.3 断陷陡坡带深层斜向大型扇三角洲储集体的勘探潜力

3.3.1 陡坡带深层发育大型斜向扇三角洲有利储集体

南堡凹陷柳赞地区和车镇凹陷北带中段作为成熟区块,油气储集层丰富。柳赞油田截至 2008 年 8 月底,已探明石油地质储量 4209 万吨,已开发动用地质储量 3193.13 万吨、可采储量 858 万吨。目前,柳赞地区探井主要分布于扇三角洲前端,已证实油藏发育,而扇体主体有待进一步勘探,潜力巨大。

车镇凹陷北带勘探面积约 600 km²,截止至 2009 年完钻探井 81 口,钻遇油层或获工业气流井 31 口,控制储量 1765 万吨,预测储量 5715 万吨,其中车 57 块沙三下亚段控制含油面积 6.8 km²,储量 657 万吨;车古 25 块沙三下亚段预测含油面积 38.2 km²,储量 3015 万吨。已发现油藏主要发现于扇体北侧,而扇体中部及南侧有待进一步勘探,具有极大的勘探潜力。

3.3.2 大型斜向扇三角洲具有优越的成藏条件

前人研究结果表明,断陷湖盆陡坡—洼槽带具有油气优先充注和保存条件良好的特点(刘震等,2006c,2007;赵贤正等,2007)。洼槽陡坡带是断陷湖盆主力生烃区,最先达到生烃门限生成油气。由于岩性圈闭形成时期早,又与烃源岩直接接触,油气可直接运移至岩性圈闭中,不需要构造圈闭或地层圈闭那种需构造运动的作用使得油气经过初次和二级的垂向和侧向运移至圈闭中,由于构造活动引起的整体沉降、抬升或掀斜使得圈闭遭受后期破坏的可能性小。

作者认为断陷早期盆内陡坡带储集体类型丰富,可同时存在多个物源方向上的沉积物向湖盆注入的过程,并在陡坡带中沉降形成粗粒沉积物。由于受控于坡度、古地貌和古水深等多种因素,形成扇三角洲、近岸水下扇和湖底扇等不同类型的沉积相,扇体规模大、厚度大,砂体位置集中,初始孔隙度大多较大,可作为油气储集体。

综合分析认为,陡坡带具有优质的生储盖条件和良好的保存环境,使得断陷湖盆早期陡坡带斜向物源将成为深层下一步勘探目标,具有极大的勘探潜力。

4 缓坡带基岩风化壳具有较大油气藏勘探潜力

随着国内外基岩油气藏相继发现,基岩储集层的勘探热度也不断增加。国外较有代表性的花岗岩潜山油气藏主要有:利比亚锡尔特盆地的 Nafoora 油田、委内瑞拉马拉开波盆地的 La Paz 油田、智利西麦哲伦盆地的 Lago_Mercedes 油田、美国堪萨斯中部的 Orth 油田、越南湄公河三角洲的白虎油田以及乍得 Bongor 盆地的 Ronier 油田等(马龙等,2006)。中国花岗岩油气藏主要分布在渤海湾盆地,如辽东湾辽西潜山带的锦州 25-1S 油气田、渤海庙西凸起至渤东凹陷东的蓬莱 9-1 油田(邓运华,2015;胡志伟等,2017),渤海海域渤中 19-6 大型变质花岗岩潜山凝析气田(徐长贵等,2019)、济阳坳陷陈家庄凸起西南部的王庄油田、渤海沙垒田凸起西北倾没端的曹妃甸 1-6 油田等(姜晓宇等,2020)。此外,酒西盆地的鸭儿峡油田和珠江口盆地的惠州凹陷、松辽盆地(易士威等,2020)、柴达木盆地阿尔金山前带(陈更新等,2020;李江涛等,2020;孙秀建等,2020)、琼东南盆地深水松南低凸起(施和生等,2019)均发现花岗岩潜山油气藏,由此可见,基岩油气藏勘探潜力巨大。作者主要以东营凹陷基岩储集层为例,介绍基岩风化壳的相关研究进展。

4.1 东部断陷基岩油气勘探面临的主要问题

中国东部基岩油气藏的勘探虽有重大发现,但仍然面临许多困难。以东营凹陷为例,统计结果表明钻遇太古界的探井有 300 余口,探井数量虽然多,但油气探明较少,仅在东营凹陷王庄地区发现高产油藏而单家寺地区却只有低产油藏,储集层主要以次生孔隙为主,非均质性强,由于经历多期构造运动和风化作用,成藏的因素比较复杂。同时储集层的厚度统计结果显示,含油层较薄,且分布规律不明显,由此可见太古界基岩油藏非常复杂。

基岩成为储集层最重要的原因就是风化壳的存在,目前对基岩风化壳储集层的形成和演化过程研究还比较薄弱,有利储集层的分布特征尚不清楚,从而导致勘探成功率较低。具体表现在以下 2 个方面:一是基岩风化壳储集层形成演化过程的动态研究比较薄弱,现有的研究更多的是从静态的角度出发,分析了现今残留的风化壳特征,而没有注意到

基岩风化壳一直经历着漫长的地质演化过程这一实际情况，从而导致研究结果和研究区实际情况差异较大；二是对基岩风化壳储集层形成—改造—保存机理的研究还比较缺乏，现有的研究主要分析了风化壳储集层的控制因素，而关于风化壳储集层边形成、边改造、边保存的特殊性方面则很少考虑，因此现有的研究难以解释研究区基岩风化壳储集层横向分布的差异性。

由于上述 2 个方面的研究比较缺乏，从而导致基岩油气藏的勘探成功率并不高。针对上述难题，作者根据地质动力学原理，结合前人在花岗岩风化壳研究方面的认识，详细介绍了笔者目前在东营凹陷基岩风化壳研究方面所取得的成果，旨在为东营凹陷基岩油气藏下一步勘探提供新的思路。

4.2 基岩风化壳双层结构成因新模式

目前，基岩风化壳纵向结构模式的研究已有很多，总体上主要有风化壳结构三分或四分等不同模式（徐国盛等，2016；王景春等，2018；伍劲等，2018；白连德等，2021）。通过分析前人划分的方案，可以发现已有的划分方案主要从静态的角度出发，并依据风化程度的强弱以及孔隙和裂缝的发育程度试图建立完整的风化壳分布模式，很显然，这类划分方案比较理想化，没有考虑风化壳一直在经历着地质演化的实际情况，即风化壳各层结构在不断的改造中分布特征具有极强的差异性。因此，现有的风化壳纵向结构划分模式与东营凹陷北带地区钻井岩心特征、野外露头特征及地震反射特征存在很大不同，而探索新的、合理的纵向结构模式就显得尤为重要。

在综合分析前人相关研究成果的基础上，并充分结合研究区地质和地震资料，建立了基岩风化壳“双层结构”新方案(图 12)，即基岩风化壳由全风化层（溶蚀层/残积层）和半风化层（崩解层）2 层结构构成。

从图 12 中可以发现，全风化层由溶蚀层或残积层组成，二者是单独存在的。结合岩心观察结果，发现残积层主要由原状基岩岩体经过高度风化后剩余的砂砾质和黏土组成，岩石结构早已破碎，呈松散状堆积。受风化程度及所处构造部位的不同，不同井中观测到的残积层厚度存在差异，总体上，残积层厚度不大。在溶蚀层发育的层段，岩心

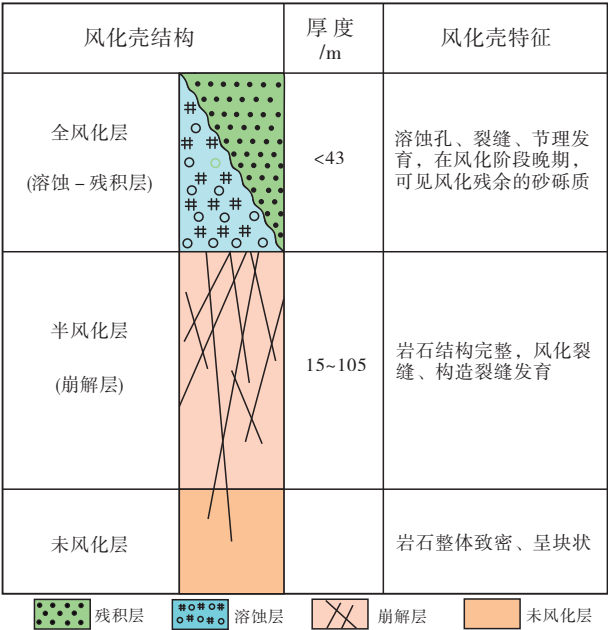


图 12 基岩风化壳双层结构成因模式
Fig. 12 Genetic model of two layer structure of bedrock weathering crust

中可见明显的溶蚀孔和裂缝，岩石结构整体较为完整，在测井曲线上，残积层和溶蚀层的响应特征存在差异。残积层发育层段电阻率测井值较小，声波时差测井值较大，电阻率曲线和声波时差曲线表现为明显的正韵律，而在溶蚀层发育层段，测井曲线表现为中电阻、中低声波时差，测井曲线波动明显，曲线跳动的幅度较大，由此可见，残积层和溶蚀层的风化程度存在一定差异，但二者同属于全风化层。

半风化层对应风化壳结构中的崩解层。在崩解层发育层段，岩心块状特征明显，几乎看不到风化作用改造的痕迹，仅在少量岩心中看到裂缝。岩石整体较为致密，结构保存完整，总体上厚度较大，呈块状展布。测井曲线上，崩解层主要呈现出高电阻、低声波时差的特征，测井曲线的形态总体较为平缓，仅在局部跳跃现象很明显，作者提出的基岩风化壳“双层结构”成因模式是对先前认识的改进和发展。认为随着风化程度的不断加强，处在风化壳结构层中的早期弱溶蚀层会逐渐演化成强溶蚀层，并会随着风化作用的进一步增强而最终演变成砂砾质的残积层，即残积层是在溶蚀层的基础上演化而来，残积层是全风化层演化高级阶段的产物。同样，溶蚀层也是由早期的崩解层发

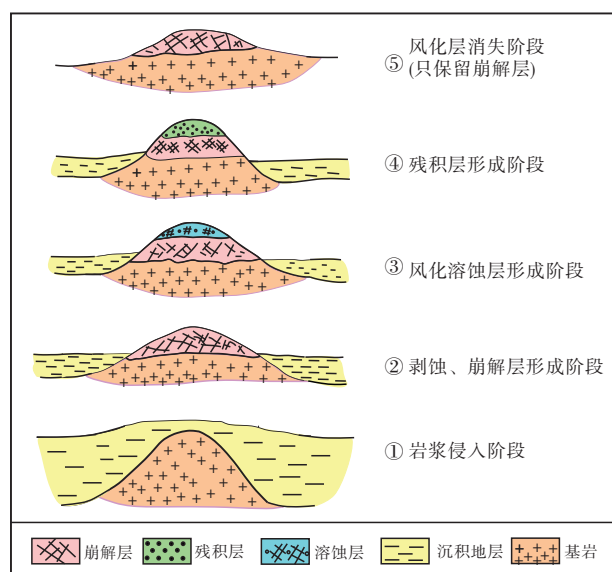


图 13 基岩风化壳演化模式

Fig. 13 Evolution model of bedrock weathering crust

育而来, 残积层和溶蚀层均为崩解层不同演化时期的产物。基于这个角度, 笔者建立了完整的基岩风化壳演化模式(图 13)。从图 13 中可以看出, 在风化壳演化的不同阶段, 其表层结构具有不同的特征。该演化模式比较合力地阐明了基岩风化壳的形成演化过程, 是风化壳“双层结构”方案的动力学成因划分依据。

4.3 基岩风化壳储集层分布模式

前人对基岩风化壳储集层的横向分布特征虽也有研究(李建平等, 2014; 王明臣等, 2016; 胡志伟等, 2017), 但由于风化壳纵向结构模式不同, 横向分布模式也必然存在差异。研究中采用露头资料, 连井剖面和地震解释相结合的方法对基岩风化壳储集层的分布特征进行了分析, 发现不同海拔高程上基岩风化壳的纵向结构存在差异。在凸起高部位只保留着崩解层, 而不见风化壳的其他结构, 即只发育崩解层单层结构; 在构造高部位边缘发育残积层, 而在构造中低部位出现溶蚀层, 但溶蚀层和残积层并没有同时存在, 发育溶蚀层的时候, 残积层不发育, 形成了溶蚀层—崩解层的结构特征; 而发育残积层的时候, 溶蚀层不发育, 构成残积层—崩解层“双层结构”。

从风化壳各层结构分布特征可以发现, 风化壳的形成和分布与海拔高程关系密切。据此, 作者建立了基岩风化壳储集层分布新模式(图 14)。可以

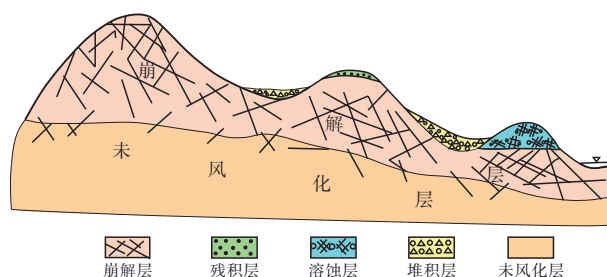


图 14 基岩风化壳储集层分布模式

Fig. 14 Reservoir distribution pattern of bedrock weathering crust

看到, 在构造高部位由于风化作用最强, 风化壳遭受破坏的程度最大, 从而只保留着结构完整、岩层致密的崩解层; 在构造中低部位, 风化程度较强, 保存薄层的残积层; 而低部位风化程度较低, 溶蚀层具备良好的保存条件, 从而形成了现今观测到的风化壳差异分布模式。

4.4 基岩风化壳储集层改造—破坏—保存机理

风化壳形成以后并不是一成不变的, 总是进行着不同程度的演化。这点可以从基岩风化壳的演化模式中看出, 其从形成开始就一直经历改造、破坏和保存作用, 从而产生了现今所观察到的风化壳差异分布特征, 这无疑给风化壳储集层的分布预测增加了极大的难度。作者以东营凹陷基岩风化壳为例, 阐述了其改造—破坏—保存机理, 旨在为风化壳有利储集层的分布预测指明方向。

对研究区的古构造形态进行了恢复, 结果表明东营凹陷北带现今剖面形态与古构造剖面差异性很大, 古近系沙河街组沙四段沉积之前, 构造形态整体较为平缓, 凸起与凹陷相对高程较小, 而在东营组沉积末期, 经过断块掀斜翘倾之后, 研究区整体构造形态变化极大, 凸起与凹陷相对高程变大, 而现今剖面是在东营组末期沉积的基础上演化而来, 在这样一个大的构造背景下, 风化壳产状也随之发生变化, 结果造成了现今的风化壳分布差异性(图 15-a)。由此可见, 构造掀斜造成的风化壳翘倾对风化壳储集层的改造作用极大。其次, 断裂会造成风化壳储集层分布的复杂化, 研究中对章丘团元沟西侧 8 km 的花岗岩露头进行了观测, 发现在风化壳内部断层发育的部位, 断层两盘岩石的形态会呈现出明显的差异性。具体表现为断层上盘岩石破碎

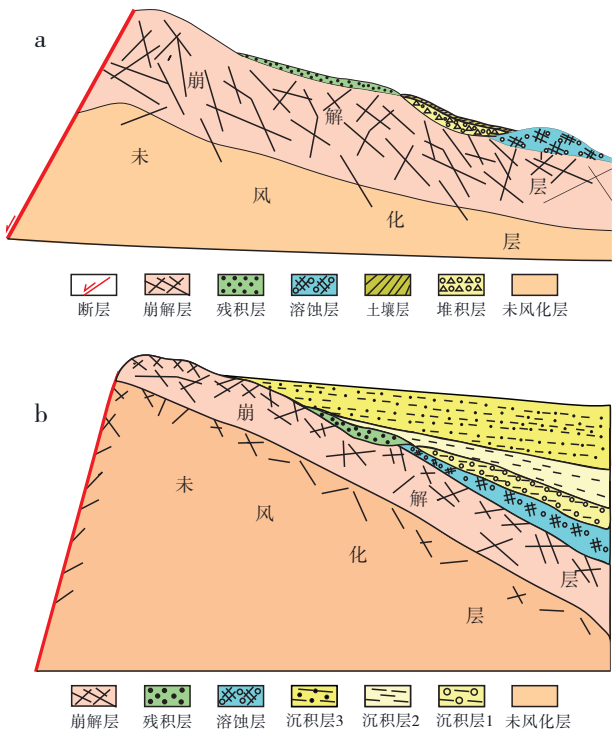
严重，下盘岩石相对完整，这说明断层对上盘岩石性质的影响远远强于下盘，这也意味着断裂的存在使风化壳的分布更加复杂。进一步，结合岩心及测井资料，发现距离断层较近的探井，岩心上可见明显的裂缝，测井曲线上电阻率值、声波时差值跳动明显，表明断层可以有效改善储集层的物性。此外，水流冲蚀作用对研究区风化壳储集层的改造和破坏作用明显。研究区陈家庄凸起带东西、南北方向的地震剖面解释结果显示，在这 2 个方向上均存在水流冲蚀破坏留下的痕迹，在东西向剖面上，流水冲蚀留下的冲蚀沟非常明显，对风化壳储集层的破坏作用很大。而在南北向剖面上，水流作用冲蚀强度则相对较小，风化壳保留较好。在上述研究的同时，注意到风化壳发育的位置不同，其遭受改造的程度也会有所差异。同时由于受到埋藏保存的时间先后差异，风化壳结构的分布也会有所不同，总体上具有高部位风化壳结构层厚度小而中低部位厚度相对较大的特征，基于此，笔者指出了基岩风化壳埋藏保存机制的重要性，认为风化壳遭受破坏后，在缓坡区保存几率更大，且保存早的风化壳比保存晚的风化壳更为有利(图 15-b)。

5 东部断陷盆地深层 3 大新领域具有重要的油气勘探意义

5.1 深层低孔渗—致密砂岩储集层动态评价方法奠定老油区勘探挖潜理论基础

实际油气勘探表明，储集层在油气充注成藏以后仍经受压实、胶结等成岩作用，而在这一演化过程中，储集层的物性发生了改变，从而造成现今砂体的含油气性与现今储集层的物性关系不大。若仅仅针对现今储集层进行评价，则并不能有效地把握住储集层评价的本质，因此成藏期的砂岩储集层物性才是影响油气藏形成的重要因素，只有针对成藏期砂岩储集层物性的评价，才能从本质上抓住储集层评价的核心。

作者提出的将砂岩储集层物性恢复至成藏期，对成藏期砂岩储集层成藏能力进行评价，即用能否成藏的标准对储集层进行评价，才更符合油气勘探的实际需要，更有效地预测有利油气储集层类型及分布范围，进而有效地指导油气勘探。从这一角度出发，过去用常规评价方法评价的一些老油区较深



a—地层翘倾后风化壳各层结构分布图；b—风化壳埋藏保存示意图
图 15 断块翘倾后基岩风化壳分布特征及风化壳埋藏保存示意图

Fig. 15 Distribution characteristics of bedrock weathering crust after block tilting and weathering crust buried preservation diagram

部层系有可能是有利储集层发育层系，过去评价较低的一些区带也有可能重新作为有利区带，从而为老油区油气勘探提供坚实的理论依据。

5.2 断陷陡坡带深层斜向扇三角洲的发现推动建立深层复合沉积体系新模式

前人将断陷早期远离边界断层边缘的盆内陡坡带的巨厚沉积物认为是沿短轴方向进入陡坡带形成垂直于边界断层的扇体，并解释为近岸水下扇。然而，本次研究在对我国东部车镇凹陷断陷湖盆陡坡带沙三下亚段早期源-汇体系的解剖中发现，在断陷早期，断陷湖盆远离控盆断层边缘的陡坡带发育与边界断层近似平行或斜交的扇体。扇体的规模和厚度大，表现出近物源沉积的特点，在空间上与短轴物源所形成的扇体表现出相接或相邻的接触关系。为了与短轴物源形成的垂直于边界断层的近岸水下扇区分，作者将此类型的扇体称之为斜向扇三角洲。

斜向扇三角洲与垂直边界断层的近岸水下扇,在空间上构成了斜向物源沉积体和短轴物源沉积体共存,这种新的发现不仅丰富了盆内陡坡带储集相类型,更重要的是对于深层复合沉积体系新模式的建立起到了重要的推动作用。此外,斜向扇三角洲的发现,对于重新认识断陷陡坡带其他方向的储集体类型及其下一步的勘探方向提供了新的思路。目前,已发现油藏主要发现于扇体北侧,而扇体中部及南侧有待进一步探究,勘探潜力巨大。

5.3 基岩风化壳双层结构及改造—破坏—保存机理推动基岩油气藏分布预测

基岩风化壳“双层结构”动态成因模式的建立,指出了风化壳储集层是由顶部残积层或溶蚀层与底部崩解层 2 个结构层构成,阐明了风化壳各层结构的演化关系,即残积层和溶蚀层均为崩解层不同演化时期的产物,不同演化阶段风化壳的表层特征存在差别。此外,从地质动力学角度出发,系统分析了风化壳的改造—破坏—保存机理,认为基岩风化壳在形成的同时,也在经历着改造和保存作用,即风化壳在形成的同时经历着构造掀斜、断裂破坏、水流冲蚀等作用,且后期地层覆盖对风化壳储集层的保存作用也十分重要。在此基础上,建立了基岩风化壳储集层的成因分布模式,认为风化壳的形成和分布与海拔高程关系密切,构造高部位由于风化作用最强,风化壳结构破坏程度较大,导致保存困难,只保留着结构完整、岩层致密的崩解层;中等高程风化程度较强,保存部分残积层,而低部位风化程度较低,经过不同演化阶段形成的溶蚀层可以得到很好的保存。

基岩风化壳双层结构模式的建立以及改造—破坏—保存机理研究对于理解风化壳的形成演化过程有很大的帮助,更值得注意的是在上述研究的基础上建立的基岩风化壳储集层的成因分布模式对于指导油气勘探具有重要的意义。以往的研究比较注重构造高部位,认为构造高部位是油气有利的聚集区,但钻探结果却总难让人满意,而文中提出的基岩风化壳储集层成因分布模式却指出构造中低部位的溶蚀层发育区是油气有利聚集带,无疑给当下基岩风化壳储集层的勘探提供了一种新的思路,对于调整未来基岩储集层勘探的方向起到了重要的指导作用。

5.4 3 大勘探新领域展现出中国东部断陷盆地深层巨大的油气勘探潜力

受石油地质认识的局限性和勘探技术的限制,中国东部断陷盆地待发现目标越来越隐蔽,油气藏的勘探开发难度越来越大。在这样的勘探背景下,文中介绍的深层低孔渗—致密砂岩储集层动态评价、洼槽带深层砂砾岩岩性圈闭勘探以及基岩地层岩性圈闭勘探新进展无疑给中国东部断陷盆地深层油气藏的勘探带来了福音。

低孔渗—致密砂岩储集层动态评价方法,抓住了油气成藏的核心问题,综合考虑了砂岩储集层成藏过程与储集层演化过程,是对成藏期储集层进行的含油气评价。储集层动态评价方法是部分老井复查的理论依据,不仅能使过去评价较低的一些区带可能重新作为有利区带,而且能够发现更多潜在的有利储集层,为致密砂岩油气勘探提供了新的方向。车镇凹陷断陷湖盆陡坡带沙三下亚段斜向扇三角洲的发现一方面对深层复合沉积体系新模式的建立起到了重要的推动作用,另一方面对于重新认识断陷陡坡带其他方向的储集体类型及其下一步的勘探方向提供了新的研究思路。截至 2009 年,车镇凹陷完钻探井 81 口,钻遇油层或获工业气流井 31 井,控制储量 1765 万吨,预测储量 5715 万吨,其中车 57 块沙三下亚段控制含油面积 6.8 km^2 ,储量 657 万吨;车古 25 块沙三亚段下预测含油面积 38.2 km^2 ,储量 3015 万吨。目前,已发现油藏主要位于扇体北侧,而扇体中部及南侧还有待进一步探究,勘探潜力巨大。在东营凹陷基岩储集层的研究中,基于地质动力学的角度提出了风化壳双层结构新模式并讨论了风化壳储集层改造—破坏—保存机理,并进一步建立了储集层的成因分布模式,最终指出构造中低部位的溶蚀层发育区是有利储集层发育带,为基岩下一步的勘探提供了方向,目前,已有钻井揭示在构造中低部位获得了工业油流,东营凹陷王庄油田已提交探明储量 777 万吨。

深层低孔渗—致密砂岩储层动态评价、洼槽带深层砂砾岩岩性圈闭勘探以及基岩地层岩性圈闭勘探新进展不仅是对东部断陷盆地油气成藏模式的补充和发展,更重要的是展现出了中国东部断陷盆地深层巨大的油气勘探潜力。图 16 展现出中国东部渤海湾盆地不同深度范围均有油气藏的发育,其中

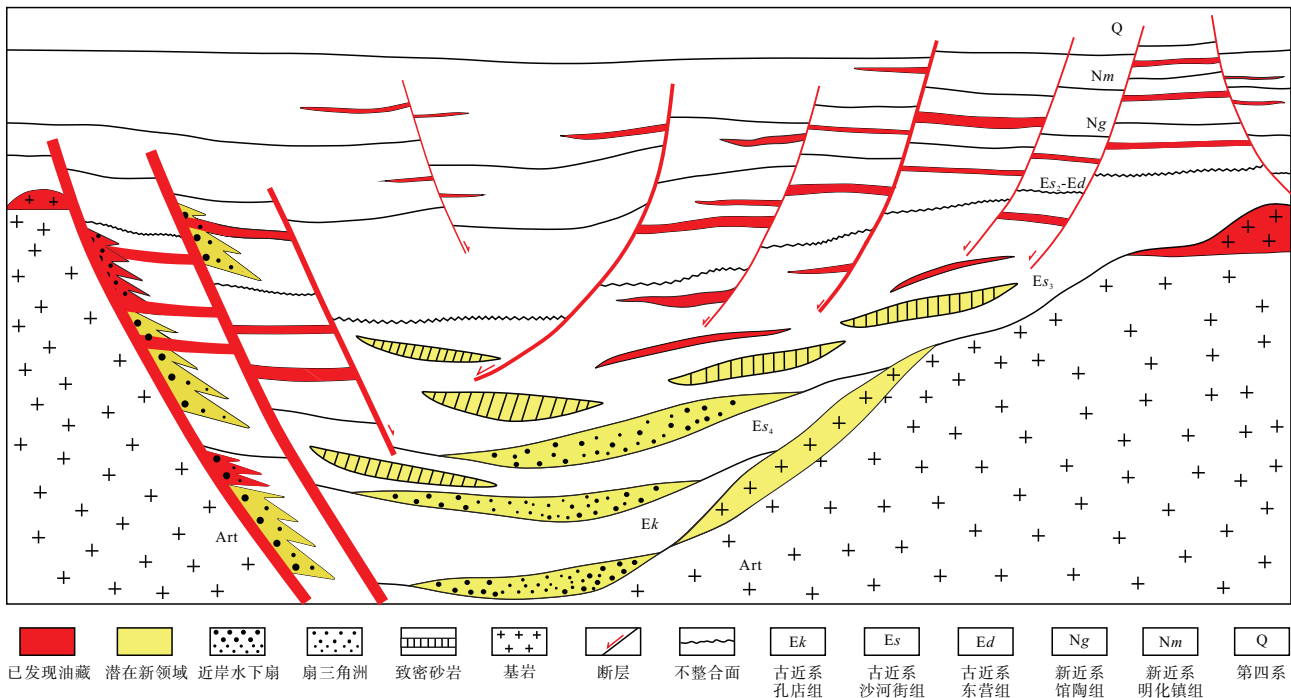


图 16 渤海湾盆地油气藏分布及勘探新领域示意图

Fig. 16 Schematic diagram showing distribution of oil and gas reservoirs and new exploration fields in Bohai Bay Basin

深层主要发育以基岩风化壳和扇三角洲砂砾岩储集体为代表的常规油气藏，以及以低孔渗—致密砂岩储集层和页岩油气为代表的非常规油气藏。而关于页岩油气的勘探，在中国东部主要集中在渤海湾盆地和松辽盆地。根据中国第 3 轮全国油气资源评价结果，初步估算东部断陷盆地古近系页岩油可采资源量 56.59 亿吨（张顺等，2016；宋明水等，2020；刘慧民等，2022），而济阳坳陷沙四上亚段、沙三下亚段游离页岩油资源量为 41 亿吨（宋明水等，2020；刘慧民，2022）。松辽盆地南部嫩一段、青二三段及青一段 3 个层位均发育泥页岩，采用热解 S1 方法初步估算长岭凹陷青一段页岩油资源量为 35 亿吨，展现出十分可观的页岩油勘探开发前景（许涵越，2014；徐兴友等，2021，2022）。由此可见，常规油气藏和非常规油气藏均具有巨大的勘探潜力，为东部成熟盆地油气勘探指出了明确的方向。

6 结论

通过对中国东部断陷盆地深层低孔渗—致密砂岩储集层动态评价、洼槽带深层斜向砂砾岩体岩性圈闭识别以及基岩风化壳结构和分布研究，得到以

下主要结论：

- 1) 从砂岩储集层物性演化过程的角度出发，提出了致密砂岩储集层动态评价的新思路，形成了利用成藏期古孔隙度评价储集层质量的新方法，指出过去评价较低的深部凹陷带低孔渗致密砂岩体仍然具有较大的勘探潜力，为老油区勘探挖潜奠定了理论基础。
- 2) 通过地震地层学方法，建立了断陷盆地陡坡带斜向大型扇三角洲沉积模式，指出了斜向大型扇三角洲砂砾岩是断陷盆地深层有利的储集体，明确了砂砾岩体是大型油气藏的有利发育区，揭示出陡坡带深层所发现的早期大型斜向扇三角洲具有重大的勘探潜力，为中国东部断陷陡坡带下一步勘探提供了新的理论依据。
- 3) 通过建立基岩风化壳“双层结构”动态成因模式，阐明了风化壳各层结构之间的演化关系，同时结合风化壳的改造—破坏—保存机理，建立了基岩风化壳储集层的成因分布模式，指出断陷盆地构造中低部位是最有利的风化壳储集层发育带，断陷盆地缓坡内带（洼槽区）风化壳是下一步油气勘探的重要新领域，给当下基岩风化壳储集层的勘探提供了一种新的思路。

参考文献 (References)

- 白连德, 邵明礼, 尹永康, 曾凡成, 向钰铄, 屈卫华, 薛松, 刘国东. 2021. 松辽盆地中央古隆起带南部基岩储层特征及油气成藏模式. 世界地质, 40(2): 1-8. [Bai L D, Shao M L, Yin Y K, Zeng F C, Xiang Y S, Qu W H, Xue S, Liu G D. 2021. Characteristics of basement rock reservoir in southern central paleo-uplift belt of Songliao Basin and its hydrocarbon accumulation models. Global Geology, 40(2): 1-8]
- 操应长, 苾克来, 王健, 远光辉, 杨田. 2011. 砂岩机械压实与物性演化成岩模拟实验初探. 现代地质, 25(6): 1152-1158. [Cao Y C, Xi K L, Wang J, Yuan G H, Yang T. 2011. Preliminary discussion of simulation experiments on the mechanical compaction and physical property evolution of sandstones. Geoscience, 25(6): 1152-1158]
- 陈冬霞, 庞雄奇, 姜振学, 张俊. 2006. 中国东部陆相盆地隐蔽油气藏成藏机理与模式. 石油勘探与开发, 33(2): 178-183. [Chen D X, Pang X Q, Jiang Z X, Zhang J. 2006. Formation mechanism and model of subtle traps in continental basins of east China. Petroleum Exploration and Development, 33(2): 178-183]
- 陈更新, 王建功, 杜斌山, 刘应如, 李艳丽, 杨会洁, 李志明, 俞晓峰. 2020. 柴达木盆地尖北地区裂缝性基岩气藏储层特征. 岩性油气藏, 32(4): 36-47. [Chen G X, Wang J G, Du B S, Liu Y R, Li Y L, Yang H J, Li Z M, Yu X F. 2020. Characteristics of fractured bedrock gas reservoir in Jianbei gas field, Qaidam Basin. Lithologic Reservoirs, 32(4): 36-47]
- 陈广坡, 王天奇, 李林波, 李书民, 李娟. 2010. 箕状断陷湖盆湖底扇特征及油气勘探: 以二连盆地赛汉塔拉凹陷腾格尔组二段为例. 石油勘探与开发, 37(1): 63-69. [Chen G P, Wang T Q, Li L P, Li S M, Li J. 2010. Characteristics of a sublacustrine fan in a half-graben rift lake basin and its petroleum prospects; case study on the second member of the Tenggeer Formation, Saihantala Sag, Erlian Basin. Petroleum Exploration and Development, 37(1): 63-69]
- 陈蓉, 田景春, 王峰, 冯强汉, 蒙小灵. 2013. 鄂尔多斯盆地高桥地区盒8段砂岩储层评价. 成都理工大学学报(自然科学版), 40(1): 8-14. [Chen R, Tian J C, Wang F, Feng Q H, Meng X L. 2013. Sandstone reservoir evaluation of Member 8 of Middle Permian Xiashihezi Formation in the Gaoqiao area of Ordos Basin, China. Journal of Chengdu University of Technology (Sci & Technol Ed), 40(1): 8-14]
- 邓运华. 2015. 渤海大中型潜山油气田形成机理与勘探实践. 石油学报, 36(3): 253-261. [Deng Y H. 2015. Formation mechanism and exploration practice of large-medium buried-hill oil fields in Bohai sea. Acta Petrolei Sinica, 36(3): 253-261]
- 侯冠群, 周文, 王永诗. 2016. 车镇凹陷北部陡坡带深水浊积扇发育特征及控制因素: 以车66井区沙三段下亚段为例. 油气地质与采收率, 23(4): 27-33. [Hou G Q, Zhou W, Wang Y S. 2016. Development features and controlling factors of deep-water turbidite-fans in north slope of Chezhen sag: a case study of the block Che66 in the lower third member of Shahejie Formation. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 23(4): 27-33]
- 胡潇, 曲永强, 胡素云, 潘建国, 尹路, 许多年, 滕团余, 王斌. 2020. 玛湖凹陷斜坡区浅层油气地质条件及勘探潜力. 岩性油气藏, 32(2): 67-77. [Hu X, Qu Y Q, Hu S Y, Pan J G, Yin L, Xu D N, Teng T Y, Wang B. 2020. Geological conditions and exploration potential of shallow oil and gas in slope area of Mahu Sag, Junggar Basin. Lithologic Reservoirs, 32(2): 67-77]
- 胡鑫, 丁晓琪, 张歆妍, 李雷, 汪孝敬. 2021. 渤南北带沙三—沙四段砂砾岩储层特征及发育主控因素. 东北石油大学学报, 45(1): 55-61. [Hu X, Ding X Q, Zhang X Y, Li L, Wang X J. 2021. Gluttenite reservoir characteristics and main controlling factors of Es3-Es4 in northern zone of Bonan. Journal of Northeast Petroleum University, 45(1): 55-61]
- 胡志伟, 徐长贵, 杨波, 黄志, 宿雯. 2017. 渤海海域蓬莱9-1油田花岗岩潜山储层成因机制及石油地质意义. 石油学报, 38(3): 274-285. [Hu Z W, Xu C G, Yang B, Huang Z, Su W. 2017. Reservoir forming mechanism of Penglai 9-1 granite buried-hills and its oil geology significance in Bohai Sea. Acta Petrolei Sinica, 38(3): 274-285]
- 姜晓宇, 张研, 甘利灯, 宋涛, 杜文辉, 周晓越. 2020. 花岗岩潜山裂缝地震预测技术. 石油地球物理勘探, 55(3): 694-704. [Jiang X Y, Zhang Y, Gan L D, Song T, Du W H, Zhou X Y. 2020. Seismic techniques for predicting fractures in granite buried hills. Oil Geophysical Prospecting, 55(3): 694-704]
- 李建平, 周心怀, 王清斌. 2014. 表生喀斯特作用对蓬莱花岗岩潜山油田风化壳储层发育的控制作用. 成都理工大学学报(自然科学版), 41(5): 556-563. [Li J P, Zhou X H, Wang Q B. 2014. Control of epigenic karstification over weathering crust reservoir development of Penglai granite buried hill oilfield. Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science Edition), 41(5): 556-563]
- 李江涛, 付锁堂, 王任一, 刘应如, 王海成, 奥文博, 马腾. 2020. 达木盆地阿尔金山前深层基岩气藏储集空间再认识与成储潜力区探讨. 天然气工业, 40(2): 90-96. [Li J T, Fu S T, Wang R Y, Liu Y R, Wang H C, Ao W B, Ma T. 2020. Reservoir space and potential reservoir-formation areas in deep bedrock gas reservoirs in Altun forelands, Qaidam Basin: recognition and discussion. Natural Gas Industry, 40(2): 90-96]
- 李丕龙, 张善文, 宋国奇, 肖焕钦, 王永诗. 2004. 断陷盆地隐蔽油气藏形成机制: 以渤海湾盆地济阳凹陷为例. 石油实验地质, 24(1): 3-10. [Li P L, Zhang S W, Song G Q, Xiao H Q, Wang Y S. 2004. Forming mechanism of subtle oil pools in fault basins: taking the Jiyang Depression of the Bohaiwan Basin as an exampl. Petroleum Geology & Experiment, 24(1): 3-10]
- 刘惠民. 2022. 济阳凹陷页岩油勘探实践与前景展望. 中国石油勘探, 27(1): 73-87. [Liu H M. 2022. Exploration practice and prospect of shale oil in Jiyang Depression. China Petroleum Exploration, 27(1): 73-87]
- 刘惠民, 张顺, 王学军, 张鹏飞, 李军亮, 王勇, 魏晓亮, 银燕, 朱德燕. 2022. 陆相断陷盆地页岩岩相组合类型及特征: 以济阳凹陷东营

- 凹陷沙四上亚段页岩为例. 地球科学. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220615.1440.002.html>. [Liu H M, Zhang S, Wang X J, Zhang P F, Li J L, Wang Y, Wei X L, Yin Y, Zhu D Y. 2022. Types and characteristics of shale lithofacies assemblages in continental fault basins: take the shale of upper Member 4 of Shahejie Formation in Dongying sag of Jiyang Depression as an example. Earth Science. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20220615.1440.002.html>]
- 刘明洁, 刘震, 王标, 张旺, 姚星, 王新征, 赵海燕. 2014. 成藏期砂岩孔隙度对油气分布的控制作用: 以东营凹陷牛庄洼陷沙三中亚段岩性油藏为例. 地质科学, 49(1): 147-160. [Liu M J, Liu Z, Wang B, Zhang W, Yao X, Wang X Z, Zhao H Y. 2014. The controls of sandstone paleo-porosity in accumulation period to hydrocarbon distribution: a case study from Es3 middle in Niuzhuang Sag, Dongying Depression. Chinese Journal of Geology, 49(1): 147-160]
- 刘震, 赵阳, 肖伟, 杜金虎, 张以民, 易士威, 刘俊榜. 2005. 内蒙古二连盆地岩性油藏形成与分布的优势性特征. 现代地质, 19(3): 570-578. [Liu Z, Zhao Y, Xiao W, Du J H, Zhang Y M, Yi S W, Liu J B. 2005. Predominant characteristics of formation and distribution for lithologic petroleum reservoir in Erlian Basin, Inner Mongolia. Geoscience, 19(3): 570-578]
- 刘震, 赵政璋, 赵阳, 赵贤正, 肖伟. 2006a. 含油气盆地岩性油气藏的形成和分布特征. 石油学报, 27(1): 17-23. [Liu Z, Zhao Z Z, Zhao Y, Zhao X Z, Xiao W. 2006a. Predominant characteristics of formation and distribution for lithologic reservoirs in petroliferous basin. Acta Petrolei Sinica, 27(1): 17-23]
- 刘震, 赵阳, 杜金虎, 肖伟, 金博, 许晓明, 梁全胜, 郝琦. 2006b. 陆相断陷盆地岩性油气藏形成与分布的“多元控油—主元富集”特征. 地质科学, 41(10): 612-635. [Liu Z, Zhao Y, Du J H, Xiao W, Jin B, Xu X M, Liang Q S, Hao Q. 2006b. Characteristics of “multi factor controlling and key factor entrapping” of formation and distribution of lithologic petroleum reservoirs in continental rift basin. Chinese Journal of Geology, 41(10): 612-635]
- 刘震, 赵贤正, 赵阳, 郝琦, 刘俊榜, 许晓明, 梁全胜, 肖伟. 2006c. 陆相断陷盆地“多元控油—主元成藏”概念及其意义. 中国石油勘探, 11(5): 13-20. [Liu Z, Zhao X Z, Zhao Y, Hao Q, Liu J B, Xu X M, Liang Q S, Xiao W. 2006c. Concept and significance of “Multi-factors controlling and key-factors reservoring” for lithologic reservoirs in continental faulted-depression basins. China Petroleum Exploration, 11(5): 13-20]
- 刘震, 陈艳鹏, 赵阳, 郝琦, 许晓明, 常迈. 2007. 陆相断陷盆地油气藏形成控制因素及分布规律概述. 岩性油气藏, 19(2): 121-127. [Liu Z, Chen Y P, Zhao Y, Hao Q, Xu X M, Chang M. 2007. Distribution and controlling factors of hydrocarbon reservoirs in continental fault basins. Lithologic Reservoirs, 19(2): 121-127]
- 刘震, 黄艳辉, 潘高峰, 刘静静, 吴迅达, 王菁, 张胜斌. 2012. 低孔渗砂岩储层临界物性确定及其石油地质意义. 地质学报, 86(11): 1815-1825. [Liu Z, Huang Y H, Pan G F, Liu J J, Wu X D, Wang J, Zhang S B. 2012. Determination of critical properties of low porosity and permeability sandstone reservoir and its significance in petroleum geology. Acta Geologica Sinica, 86(11): 1815-1825]
- 马洪, 王循, 李欣, 闫伟鹏, 郭彬程, 黄福喜, 唐惠. 2012. 渤海湾盆地深层致密砂岩气勘探潜力浅析. 山东科技大学学报(自然科学版), 31(5): 63-70. [Ma H, Wang X, Li X, Yan W P, Guo B C, Huang F X, Tang H. 2012. Analysis of exploration potential about tight sandstone gas in deep zone of Bohai Bay Basin. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 31(5): 63-70]
- 马龙, 刘全新, 张景康, 卫平生, 陈启林, 张虎权. 2006. 论基岩的油气勘探前景. 天然气工业, 26(1): 41-46. [Ma L, Liu Q X, Zhang J L, Wei P S, Chen Q L, Zhang H Q. 2006. The prospect of oil and gas exploration in bedrock. Natural Gas Industry, 26(1): 41-46]
- 孟元林, 潘雪梅, 吴河勇, 王成, 李明明, 张安达, 修洪文, 王正伟. 2010. 松辽盆地北部中浅层含油饱和度和孔隙度的关系与油气侵位对成岩作用的抑制. 矿物岩石地球化学通报, 29(1): 11-16. [Meng Y L, Pan X M, Wu H Y, Wang C, Li M M, Zhang A D, Xiu H W, Wang Z W. 2010. Porosity and oil saturation correlation and diagenetic retardation of sandstone by hydrocarbon emplacement in the shallow-middle strata of the Northern Songliao Basin. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 29(1): 11-16]
- 孟元林, 刘文慧, 孟凡晋, 梁伯勋, 王建伟, 潘雪梅. 2011. 松辽盆地徐家围子断陷深层异常高孔带分布特征与成因分析. 古地理学报, 13(1): 75-84. [Meng Y L, Liu W H, Meng F J, Liang B X, Wang J W, Pan X M. 2011. Distribution and origin of abnormal high porosity zones of the Xujiaweizi fault depression in Songliao Basin. Journal of Paleogeography (Chinese Edition), 13(1): 75-84]
- 庞雄奇, 李丕龙, 张善文, 陈冬霞, 宋国奇, 王永诗, 张俊. 2007. 陆相断陷盆地地相—势耦合控藏作用及其基本模式. 石油与天然气地质, 28(5): 641-652. [Pang X Q, Li P L, Zhang S W, Chen D X, Song G Q, Wang Y S, Zhang J. 2007. Control of facies-potential coupling on hydrocarbon accumulation in continental faulted basins and its basic geological models. Oil & Gas Geology, 28(5): 641-652]
- 秦伟军. 2006. 中国东部断陷盆地石油潜力资源量分布及转化探明储量潜力. 当代石油石化, 14(8): 21-22, 25. [Qin W J. 2006. Distribution of potential petroleum resources and invert potential of geologic reserves in the eastern fractured basins of China. Petroleum & Petrochemical Today, 14(8): 21-22, 25]
- 秦伟军, 张中华. 2015. 中国东部断陷盆地油气勘探开发现状及技术需求. 石油科技论坛, 34(6): 42-45. [Qin W J, Zhang Z H. 2015. Present conditions and technological demand of oil and gas exploration and development in China's eastern faulted basins. Petroleum Technology Forum, 34(6): 42-45]
- 施和生, 杨计海, 张迎朝, 甘军, 杨金海. 2019. 琼东南盆地地质认识创新与深水领域天然气勘探重大突破. 中国石油勘探, 24(6): 691-698. [Shi H S, Yang J H, Zhang Y C, Gan J, Yang J H. 2019. Geological understanding innovation and major breakthrough to natural gas exploration in deep water in Qiongdongnan Basin. China Petroleum Exploration, 24(6): 691-698]
- 史基安, 王金鹏, 毛明陆, 王琪, 郭正权, 郭雪莲, 卢龙飞. 2003. 鄂尔多斯盆地西峰油田三叠系延长组长6—8段储层砂岩成岩作用

- 研究. 沉积学报, 21(3): 373-380. [Shi J A, Wang J P, Mao M L, Wang Q, Guo X Z, Guo X L, Lu L F. 2003. Reservoir Sandstone Diagenesis of Member 6 to 8 in Yanchang Formation (Triassic), Xifeng Oilfield, Ordos Basin. Acta Sedimentologica Sinica, 21(3): 373-380]
- 宋明水, 刘惠民, 王勇, 刘雅利. 2020. 济阳坳陷古近系页岩油富集规律认识与勘探实践. 石油勘探与开发, 47(2): 225-235. [Song M S, Liu H M, Wang Y, Liu Y L. 2020. Enrichment rules and exploration practices of Paleogene shale oil in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China, Petroleum Exploration and Development, 47(2): 225-235]
- 孙秀建, 马峰, 白亚东, 王波, 管斌, 罗娜, 魏顺科. 2020. 柴达木盆地阿尔金山山前带基岩气藏差异富集因素. 新疆石油地质, 41(4): 394-401. [Sun X J, Ma F, Bai Y D, Wang B, Guan B, Luo N, Wei S K. 2020. Differentiated hydrocarbon enrichment factors of bedrock gas reservoir in piedmont belt of Altun mountain, Qaidam Basin. Xinjiang Petroleum Geology, 41(4): 394-401]
- 王化爱, 钟建华, 杨少勇, 张长好, 王金华. 2009. 柴达木盆地乌南—绿草滩地区下油砂山组滩坝砂岩特征与储层评价. 石油地球物理勘探, 44(5): 597-602. [Wang H A, Zhong J H, Yang S Y, Zhang C H, Wang J H. 2009. Lower Oil Sand Hill Formation beach-bar sandstone characteristics and reservoir evaluation in Wunan Lv-caotan area. Oil Geophysical Prospecting, 44(5): 597-602]
- 王景春, 窦立荣, 徐建国, 魏小东, 王中凡, 陈洪芝. 2018. “两宽一高”地震资料在花岗岩潜山储层表征中的应用: 以乍得邦戈盆地为例. 石油地球物理勘探, 53(2): 320-328. [Wang J C, Dou L R, Xu J G, Wei X D, Wang Z F, Chen H Z. 2018. Application of “two wide and one high” seismic data in the characterization of granite buried hill reservoirs: a case study of in the Bangor Basin. Petroleum Geophysical Exploration, 53(2): 320-328]
- 王明臣, 官大勇, 刘朋波, 张参, 苏凯, 任健. 2016. 渤海蓬莱 9-1 油藏花岗岩储层特征与成储化条件分析. 地质科技情报, 35(6): 83-89. [Wang M C, Guan D Y, Liu P B, Zhang C, Su K, Ren J. 2016. Characteristics and formation conditions of the Penglai 9-1 granite oil reservoir in Bohai Gulf Basin. Geological Science and Technology Information, 35(6): 83-89]
- 王有智, 毛鑫, 刘丽莉, 李丹. 2020. 方正断陷白垩系含砂砾岩储层孔喉特征. 东北石油大学学报, 44(2): 36-45. [Wang Y Z, Mao C, Liu L L, Li D. 2020. Pore throat characteristics of glutenite reservoirs in Cretaceous of Fangzheng Depression. Journal of Northeast Petroleum University, 44(2): 36-45]
- 伍劲, 高先志, 周伟, 张永庶, 杨云, 由超. 2018. 柴达木盆地东坪地区基岩风化壳与油气成藏. 新疆石油地质, 39(6): 666-672. [Wu J, Gao X Z, Zhou W, Zhang Y S, Yang Y, You C. 2018. Base rock weathering crusts and petroleum accumulation in dongping area, Qaidam Basin. Xinjiang Petroleum Geology, 39(6): 666-672]
- 鲜本忠, 王永诗, 周廷全, 孙立东. 2007. 断陷湖盆陡坡带砂砾岩体分布规律及控制因素: 以渤海湾盆地济阳坳陷车镇凹陷为例. 石油勘探与开发, 34(4): 429-436. [Xian B Z, Wang Y S, Zhou T Q, Sun L D. 2007. Distribution and controlling factors of glutenite bodies in the actic region of a rift basin: an example from Chezheng Sag, Bohai Bay Basin. Petroleum Exploration and Development, 34(4): 429-436]
- 徐国盛, 陈飞, 周兴怀, 王昕, 李建平, 王国芝, 王霄, 范蕾. 2016. 蓬莱 9-1 构造花岗岩古潜山大型油气田的成藏过程. 成都理工大学学报(自然科学版), 43(2): 153-162. [Xu G S, Chen F, Zhou X H, Wang X, Li J P, Wang G Z, Wang X, Fan L. 2016. Hydrocarbon accumulation process of large scale oil and gas field of granite buried hill in Penglai 9-1 structure, Bohai, China. Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science Edition), 43(2): 153-162]
- 徐兴友, 刘卫彬, 白静, 陈珊, 李耀华. 2021. 松辽盆地南部青山口组一段页岩油富集地质特征及资源潜力. 地质与资源, 30(3): 296-305. [Xu X Y, Liu W B, Bai J, Chen S, Li Y H. 2021. Enrichment characteristics and resource potential of shale oil in the first member of Qingshankou Formation in southern Songliao basin. Geology and Resources, 30(3): 296-305]
- 徐兴友, 刘卫彬, 白静, 陈珊, 李耀华. 2022. 松辽盆地南部陆相页岩油气勘查突破及意义. 天然气工业, 42(3): 12-20. [Xu X Y, Liu W B, Bai J, Chen S, Li Y H. 2022. Breakthroughs in continental shale oil and gas exploration in the southern Songliao Basin and its implications for carbon neutrality. Natural Gas Industry, 42(3): 12-20]
- 徐长贵. 2013. 陆相断陷盆地源—汇时空耦合控砂原理: 基本思想、概念体系及控砂模式. 中国海上油气, 25(4): 1-11. [Xu C G. 2013. Controlling sand principle of source-sink coupling in time and space in continental rift basins: basic idea, conceptual systems and controlling sand models. China Offshore Oil and Gas, 25(4): 1-11]
- 徐长贵, 于海波, 王军, 刘晓健. 2019. 渤海海域渤中 19-6 大型凝析气田形成条件与成藏特征. 石油勘探与开发, 46(1): 25-38. [Xu C G, Yu H B, Wang J, Liu X J. 2019. Formation conditions and accumulation characteristics of Bozhong 19-6 large condensate gas field in offshore Bohai Bay Basin. Petroleum Exploration and Development, 46(1): 25-38]
- 许涵越. 2014. 松辽盆地南部青山口组页岩油资源潜力评价. 东北石油大学硕士论文. [Xu H Y. 2014. Evaluation on shale oil resources in Qingshankou Formation of the southern Songliao basin. Masteral dissertation of Northeast Petroleum University]
- 杨正明, 张英芝, 郝明强, 刘先贵, 单文文. 2006. 低渗透油田储层综合评价方法. 石油学报, 27(2): 64-67. [Yang Z M, Zhang Y Z, Hao M Q, Liu X G, Shan W W. 2006. Comprehensive evaluation of reservoir in low-permeability oilfields. Acta Petrolei Sinica, 27(2): 64-67]
- 易士威, 李明鹏, 徐淑娟, 郭绪杰, 崔宝文, 蒙启安, 程宏岗, 武雪琼, 崔俊峰, 王立贤. 2020. 松辽盆地中央隆起潜山成藏条件及模式. 天然气地球科学, 31(12): 1663-1676. [Yi S W, Li M P, Xu S J, Guo X J, Cui B W, Meng Q A, Cheng H G, Wu X Q, Cui J F, Wang L X. 2020. Accumulation condition and model of buried hill in the Central Uplift, Songliao Basin. Natural Gas Geoscience, 31(12): 1663-1676]

- 尹昕, 应文敏. 2013. 鄂尔多斯盆地大牛地气田上古生界低孔渗砂岩储层评价. 矿物岩石, 25(2): 104-109. [Yin X, Ying W M. 2013. Reservoir evaluation for the low porosity and permeability sandstone of Upper Paleozoic in the Danidi gas field, Ordos Basin. Journal of Mineralogy and Petrology, 25(2): 104-109]
- 于兴河, 姜辉, 李胜利, 陈永峤. 2007. 中国东部中、新生代陆相断陷盆地沉积充填模式及其控制因素: 以济阳坳陷东营凹陷为例. 岩性油气藏, 19(1): 39-45. [Yu X H, Jiang H, Li S L, Chen Y Q. 2007. Depositional filling models and controlling factors on Mesozoic and Cenozoic fault basins of terrestrial facies in eastern China: a case study of Dongying Sag of Jiyang Depression. Lithologic Reservoirs, 19(1): 39-45]
- 袁东山, 张枝焕, 刘洪军. 2005. 油气充注对晚期碳酸盐矿物胶结作用的影响. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 27(2): 298-300.
- 张抗, 门相勇. 2014. 中国未开发石油储量分析和对策. 中国石油勘探, 19(5): 23-31. [Zhang K, Men X Y. 2014. Analysis and strategy of China's undeveloped oil reserves. China Petroleum Exploration, 19(5): 23-31]
- 张锐, 纪友亮, 岳文珍, 齐立新. 2012. 陡坡带扇三角洲高分辨率层序地层学: 以柳赞油田北区沙三~3亚段下部砂层组为例. 科学技术与工程, 12(15): 3587-3590. [Zhang R, Ji Y L, Yue W Z, Qi L X. 2012. High-resolution sequence stratigraphy for fan delta at steep slope belt: taking the lower sand groups of the Third-submember sedimentation of Member III of Shahejie Formation in the north region of Liuzan oilfield as an example. Science Technology and Engineering, 12(15): 3587-3590]
- 张顺, 刘惠民, 宋国奇, 王永诗, 陈世悦, 张守鹏. 2016. 东营凹陷页岩油储集空间成因及控制因素. 石油学报, 37(12): 1495-1507, 1527. [Zhang S, Liu H M, Song G Q, Wang Y S, Chen S Y, Zhang S P. 2016. Genesis and control factor of shale oil reserving in Dongying sag. Acta Petrolei Sinica, 37(12): 1495-1507, 1527]
- 赵贤正, 金凤鸣, 刘震, 张以明, 王权, 韩春元. 2007. 二连盆地地层岩性油藏“多元控砂—四元成藏—主元富集”与勘探实践(I): “多元控砂”机理. 岩性油气藏, 19(2): 9-15. [Zhao X Z, Jin F M, Liu Z, Zhang Y M, Wang Q, Han C Y. 2007. Multi-factor controlling, four-factor entrapping and key-factor enrichment of stratigraphic-lithologic reservoirs and exploration practice in Erlian Basin(I): “multi-factor controlling” mechanism. Lithological Reservoir, 19(2): 9-15]
- 赵贤正, 金凤鸣, 王权, 韩春元, 康如坤. 2011. 陆相断陷盆地洼槽聚油理论及其应用: 以渤海湾盆地冀中坳陷和二连盆地为例. 石油学报, 32(1): 18-24. [Zhao X Z, Jin F M, Wang Q, Han C Y, Kang R K. 2011. Theory of hydrocarbon accumulation in troughs within continental faulted basins and its application: a case study in Jizhong Depression and Erlian Basin. Acta Petrolei Sinica, 32(1): 18-24]
- 赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 肖敦清, 姜文亚, 韩文中, 陈长伟, 邹磊落, 郭淑文. 2017. 断陷湖盆斜坡区油气富集理论与勘探实践: 以黄骅坳陷古近系为例. 中国石油勘探, 22(2): 13-23. [Zhao X Z, Zhou L H, Pu X G, Xiao D Q, Jiang W Y, Han W Z, Chen C W, Zou L L, Guo S W. 2017. Hydrocarbon enrichment theory and exploration practice in the slope of fault lake basin: a case study of Paleogene in Huanghua depression. China Petroleum Exploration, 22(2): 13-23]
- 赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 金凤鸣, 姜文亚, 肖敦清, 韩文中, 时战楠. 2018. 断陷盆地洼槽聚油理论的发展与勘探实践: 以渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔店组为例. 石油勘探与开发, 45(6): 1092-1102. [Zhao X Z, Zhou L H, Pu X G, Jin F M, Jiang W Y, Xiao D Q, Han W Z, Shi Z N. 2018. Development and exploration practice of the concept of hydrocarbon accumulation in rifted-basin troughs: a case study of Paleogene Kongdian Formation in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin. Petroleum Exploration and Development, 45(6): 1092-1102]
- Cao Y, Wang Y, Gluyas J G. 2018. Depositional model for lacustrine near-shore subaqueous fans in a rift basin: the Eocene Shahejie Formation, Dongying Sag, Bohai Bay Basin, China. Sedimentology, 65(6): 2117-2148.
- Henstra G A, Gawthorpe R L, Helland-Hansen W. 2017. Depositional systems in multiphase rifts: seismic case study from the Lofoten margin, Norway. Basin Research, 29(4): 447-469.
- Levenson A I. 2006. Geology of Petroleum(2nd ed). CBS Publisher & Distributors.
- Powers M C. 1967. Fluid-release mechanisms in compacting marine mudrocks and their importance in oil exploration. AAPG Bulletin, 51(7): 1240-1254.
- Selley R C. 1978. Porosity gradients in North Sea oil-bearing sandstones. Journal of the Geological Society, 135(1): 119-132.
- Zhao X Z, Jin F M, Wang Q. 2011. Hydrocarbon accumulation principles in troughs within faulted depressions and their significance in exploration. Petroleum Science, 8(1): 1-10.

(责任编辑 李新坡; 英文审校 李攀)