

doi:10.3799/dqkx.2016.043

北黄海盆地下白垩统致密砂岩储层特征及成因

王改云, 刘金萍*, 简晓玲, 王后金, 杜 民, 万晓明

广州海洋地质调查局国土资源部海底矿产资源重点实验室, 广东广州 510075

摘要: 北黄海盆地是我国近海勘探及研究程度均较低的中新生代叠合断陷盆地, 下白垩统砂岩储层是主要的勘探目的层段, 储层致密是制约该区油气勘探的“瓶颈”之一。通过岩心观察、薄片分析、扫描电镜观测、压汞分析、物性统计等研究, 对北黄海盆地东部坳陷下白垩统的储层特征进行了研究, 从沉积、成岩、埋藏史等方面对其致密化成因进行了探讨。结果表明, 下白垩统储层以扇三角洲沉积为主, 物性总体较差, 属于特低孔特低渗的致密砂岩储层, 储集空间主要有粒间溶孔、粒内溶孔、微裂缝等次生孔隙, 属孔隙—裂缝双孔介质储层, 孔隙结构复杂。该储层特征主要受沉积相带、成岩作用及埋藏史等因素控制, 储层砂体以长石岩屑砂岩、岩屑长石砂岩为主, 成分及结构成熟度中等, 原始储层物性差, 高含量的塑性岩屑不利于原生孔隙的保存, 沉积物粒度决定微裂缝的发育程度。成岩作用起主导作用, 受早期深埋—中期抬升剥蚀—晚期再次深埋的这一特定埋藏过程影响, 早期强烈压实, 后期石英自生加大、方解石胶结、自生矿物晶出等胶结作用导致储层整体致密。长石的溶蚀和粘土化促进了次生孔隙的形成, 但烃类充注时间晚、酸性流体活动弱, 溶蚀作用受到抑制。后期构造作用产生的微裂隙则是改善储层物性的另一重要作用。

关键词: 北黄海盆地; 下白垩统; 致密砂岩储层; 沉积学。

中图分类号: P539.2

文章编号: 1000-2383(2016)03-0523-10

收稿日期: 2015-11-12

Characteristics and Genetic Mechanism of Tight Sandstone Reservoirs of Lower Crataceous in North Yellow Sea Basin

Wang Gaiyun, Liu Jinping*, Jian Xiaoling, Wang Houjin, Du Min, Wan Xiaoming

MLR Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China

Abstract: North Yellow Sea Basin is a typical Meso-Cenozoic superimposed fault basin, which has undergone few exploration and research in the offshore of China. The sandstone reservoirs of Lower Crataceous are the main exploration targets, but reservoirs tightness is the “bottleneck” which restricts the exploration activity in North Yellow Sea Basin. By core observation, thin section analysis, scanning scanning electron microscope observation, mercury penetration analysis, porosity and permeability statistics, the reservoirs characteristics of Lower Crataceous in eastern depression in North Yellow Sea Basin were researched in this paper. According to deposition, diagenesis, burial history, and so on, the origin mechanism of tightness of the reservoirs was analyzed. The results show that the sedimentary facies type of reservoirs is mainly fan delta. Reservoir physical properties are poor, belonging to extra-low porosity and extra-low permeability tight sandstone reservoirs. Main reservoir spaces are corrosion pores between grains or in grains and a few micro-fractures. The reservoir belongs to dual porosity reservoirs with pores and fractures, and the pore structure is complex. The reservoirs characteristics are controlled by sedimentary facies zone, diagenesis and burial history. The reservoir lithology is mainly feldspathic lithic sandstone and lithic feldspathic sandstone, which have medium textural maturity and compositional maturity, resulting in poor initial reservoir quality. The high content of plastic debris is not conducive to the preservation of primary porosity. The grain size of sediment affects the development of micro-fractures. The diagenesis predominates in the reservoirs tightness. The diagenetic process is decided by the burial history, which includes early deep burial, middle uplift denudation, and later deep burial. The reservoirs tightness is

基金项目: 国土资源部海底矿产资源重点实验室开放基金(No. KLMMR-2014-A-10); 国家自然科学基金项目(No. 41302100)。

作者简介: 王改云(1980—), 女, 工程师, 主要从事层序地层学及储层沉积学研究。E-mail: gaiyun520@163.com

* **通讯作者:** 刘金萍, E-mail: 2497246@qq.com

引用格式: 王改云, 刘金萍, 简晓玲, 等, 2016. 北黄海盆地下白垩统致密砂岩储层特征及成因. 地球科学, 41(3): 523-532.

mainly caused by intense compaction in early phase and cementation in later phase, such as quartz increase, calcite cementation, and spontaneous mineral crystal. Feldspar corrosion and inverting kaolinite facilitate the formation of secondary porosity. The late of hydrocarbon injection causes the weak acid fluid activity, which inhibits dissolution. Fractures without displacement in later phase improve partly the reservoir property.

Key words: North Yellow Sea basin; Lower Crataceous; tight sandstone reservoirs; sedimentology.

北黄海盆地是发育于华北地台上的中生代小型叠合断陷盆地,是我国近海勘探及研究程度均较低的一个含油气盆地(肖国林等,2005).近几年来,我国和朝鲜都在该盆地进行了大量的油气勘探工作,获得了一批实钻资料,为该盆地诸多地质认识提供了依托.东部拗陷是北黄海盆地最具勘探前景的一个拗陷(陈玲等,2006),其内发育巨厚的中生代地层,具备一定的生油气能力,且多口钻井已在中生界见油气显示及工业油气流(刘振湖等,2007;梁世友等,2011).该拗陷下白垩统砂岩储层是最主要的勘探目的层段,油气显示活跃,但整体试油结果不理想,储层致密是制约该区油气勘探能否取得重大突破的主要“瓶颈”(高顺莉等,2013).受勘探程度的限制,前期从成岩角度对储层进行了一定程度的研究(王强等,2010;梁杰等,2013),但缺乏系统、详细的储层致密化成因分析.因此,在前人研究成果的基础上,笔者综合利用钻井取心、岩石薄片、压汞测试资料、扫描电镜资料、物性测试资料等,对北黄海盆地东部拗陷下白垩统储层特征进行了研究,并从沉积、成岩、埋藏史、构造演化等多方面分析了储层致密化的主要成因,为该区致密储层的甜点预测提供了理论指导,也为碎屑岩致密储层的成因机制的研究提供范例.

1 区域地质背景

北黄海盆地处于中朝板块东南部,其西为郯庐断裂和渤海湾盆地,北面为辽东隆起,东接朝鲜北部地块,南邻胶东隆起和苏胶—临津江碰撞造山带.现今的北黄海盆地呈隆拗相间的构造格局,包括东部拗陷、东部隆起、中部拗陷、中—西部隆起、西部拗陷及南部拗陷群等 6 个一级构造单元(图 1),其中仅在东部拗陷和中部拗陷发育中生代地层.

东部拗陷经历多期构造运动,地层发育和展布复杂(王后金等,2014).其基底主要为太古宇—下元古界石英岩、片岩、片麻岩、板岩等中—深变质的结晶岩系和中上元古界—寒武系的碳酸盐岩、板岩等.自中侏罗世以来开始沉降并接受沉积,经历了中侏

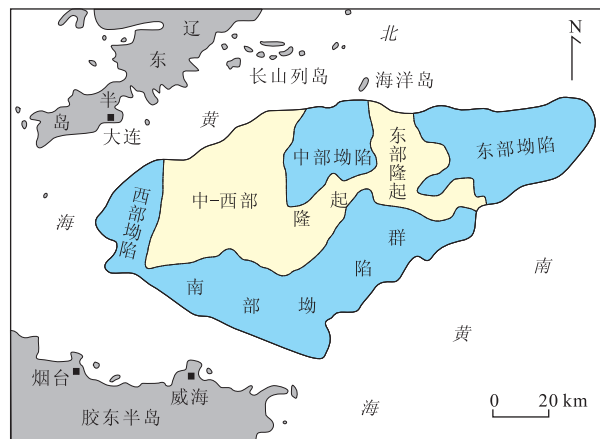


图 1 北黄海盆地地理位置及构造区划分

Fig. 1 Geographic location and geotectonic map of North Yellow Sea basin

据刘振湖等(2007),略修改

罗世—早白垩世断陷、晚白垩世—古新世构造反转、始新世—渐新世断陷、晚渐新世—早中新世构造反转及中中新世—第四纪区域沉降等 5 个发育演化阶段(王后金等,2014),自下而上形成多旋回的构造—沉积组合(中生界的中侏罗统—下白垩统、新生界的渐新统—第四系),最大沉积厚度超过 8 000 m(李文勇等,2009).

下白垩统总体为一套以红色色调为主的杂色碎屑岩组合,是有利储层的主要发育层段.岩性底部为砂砾岩、含砾砂岩、粗砂、粉细砂岩组合,向上渐变为红褐色泥岩夹粉细砂岩.下白垩统依次超覆于底部角度不整合之上,受燕山晚期挤压反转的影响,顶部遭受强烈剥蚀.这种下超上剥作用,导致现今的下白垩统厚度和岩性横向上变化较大,现今残余地层厚度介于 0~1 750 m.其中工区西北部地层厚度最大,钻遇地层较全,东南部地层厚度小,局部剥蚀殆尽.

2 下白垩统沉积相及砂体展布

早白垩世气候干热,沉积了一套以红色色调为主的杂色碎屑岩组合.下白垩统垂向包括 2 个三级层序(K_1SQ_1 、 K_1SQ_2),发育扇三角洲—滨浅湖沉积序列.以 NYS1 井为例, K_1SQ_1 下段岩性以粉砂岩、

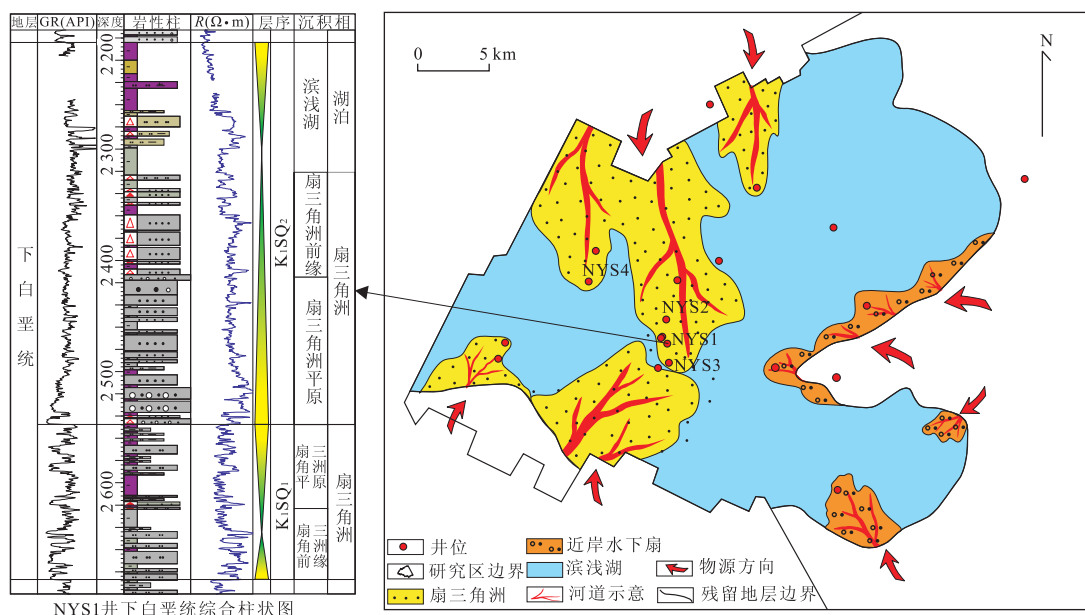


图2 北黄海盆地东部坳陷下白垩统沉积相分布(深度单位:m)

Fig. 2 Sedimentary facies of Lower Crataceous in the eastern depression of North Yellow Sea basin

细砂岩、泥质粉砂岩、泥岩为主。自下而上由扇三角洲前缘亚相过渡为扇三角洲平原亚相,为一个完整的短期水进—长期水退沉积旋回。K₁SQ₂下部岩性整体较粗,主要为砂砾岩、含砾粗砂岩、细砂岩、粉砂岩、泥岩等,中上部以细粒的泥质沉积为主。单个沉积规模向上逐渐变小,整体构成水体向上变深的地层堆砌样式,自下而上沉积环境由扇三角洲平原亚相渐变为扇三角洲前缘亚相,再过渡为滨浅湖沉积(图2)。

平面上,东部坳陷整体处于浅水状态,北部及南部的隆起区共同控制了主体沉积格局(王改云等,2015),主物源从北部和西南方向向湖区推进,以扇三角洲沉积为主,在湖盆中部交汇。东部及东南部断裂的下降盘发育多个近岸水下扇沉积(图2)。

有利砂体的成因类型主要为扇三角洲分流河道及滨浅湖滩坝砂体,平面上主要分布在研究区中西部。受河道频繁侧向迁移的影响,分流河道砂体多垂向叠置、平面拼合成大面积复合砂体。其岩性以中细砂岩、粉砂岩为主,其次为含砾砂岩、砂质砾岩和泥质粉砂岩。

3 下白垩统储层特征

3.1 储层岩性

通过5口井的岩心观察及52块岩样的镜下鉴

定,下白垩统储层主要为长石岩屑砂岩,次为岩屑长石砂岩,其中,长石以钾长石为主,偶见斜长石;岩屑以花岗岩、凝灰岩、流纹岩、灰岩为主,少量砂岩、泥岩。Q/(F+R)值介于0.90~8.52之间,其中<4的占比达90%以上,成分成熟度中等。储层中碎屑颗粒磨圆以次棱—次圆状为主,分选中等—较差居多,粘土矿物含量多<5%,结构成熟度中等。

3.2 储层物性

通过4口井267块岩心样品的物性数据可知,储层属特低孔特低渗储层。孔隙度一般介于2%~10%之间,平均6.83%;渗透率多在 $0.01 \times 10^{-3} \sim 0.50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 之间,平均 $0.49 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,其中孔隙度小于10%、渗透率小于 $1.00 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的样品均占到总样品的90%以上,储层致密特征明显(邹才能,2011)。孔隙度和渗透率之间略呈正相关关系,但相关系数较低,数据点比较分散(图3),说明其孔隙结构比较复杂。

3.3 储层孔隙结构

综合分析岩石铸体薄片、扫描电镜等资料,下白垩统储层储集空间以次生孔隙为主,主要为粒间溶孔、粒内溶孔,次为微裂缝,见少量铸模孔及杂基微孔(图4),有效储层为孔隙—裂缝双孔介质储层(高顺莉等,2013)。其中粒间溶孔多为长石、岩屑等碎屑颗粒边缘及粒间胶结物被溶蚀形成的孔隙,形态多样(图4a、4b);粒内溶孔为长石、岩屑等不稳定颗粒的内部被溶蚀产生的孔隙,形态多为斑点状、蜂窝状

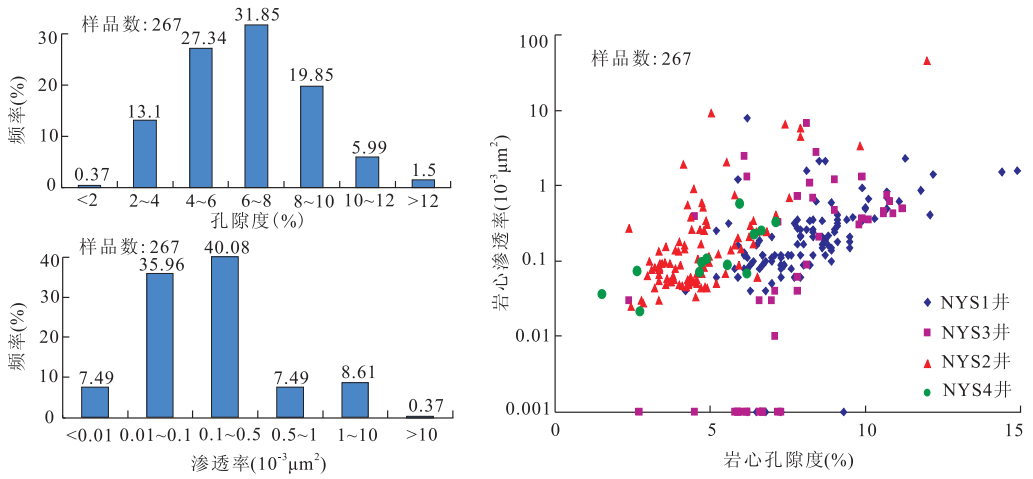


图 3 下白垩统储层物性分布特征

Fig. 3 Reservoir properties of Lower Crataceous

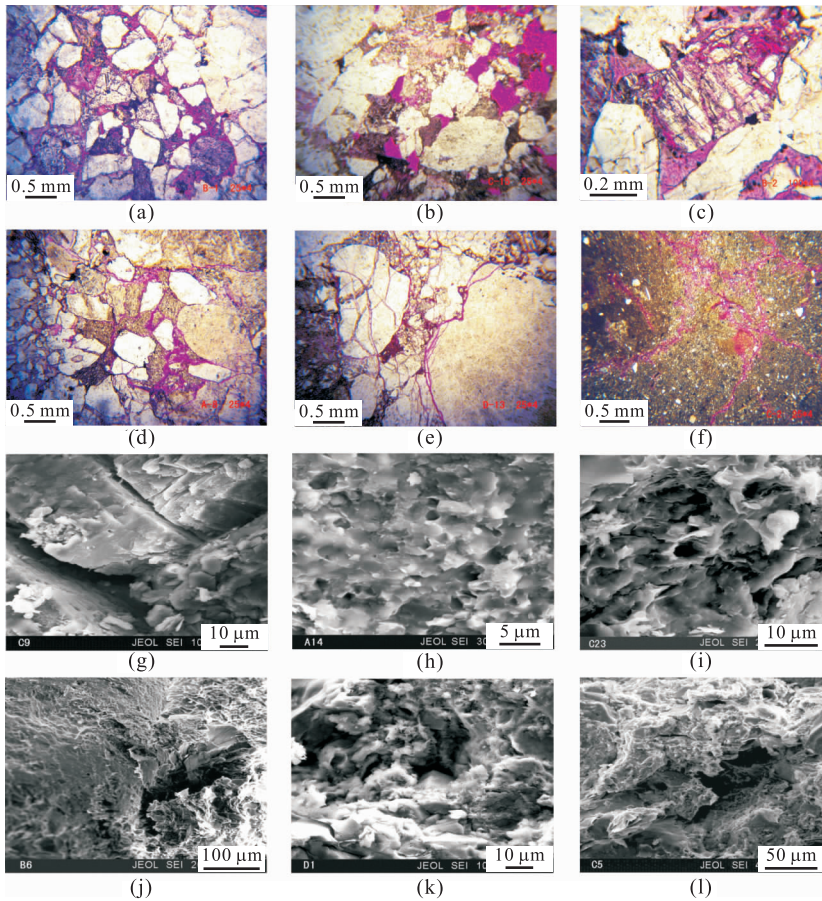


图 4 下白垩统储层孔隙类型

Fig. 4 Pore types of Lower Crataceous reservoir

a. 粒间溶孔, (—), NYS2 井, 2 292. 98 m, 含砾长石粗砂岩; b. 粒间溶孔, (—), NYS1 井, 2 420. 80 m, 含砾粗砂岩; c. 粒内溶孔, (—), NYS2 井, 2 295. 10 m, 砂质砾岩; d. 微裂缝, (—), NYS4 井, 2 219. 80 m, 砂质砾岩; e. 微裂缝, (—), NYS3 井, 3 049. 75 m, 含钙砂质砾岩; f. 微裂缝, (—), NYS1 井, 2 334. 65 m, 含白云粉砂质泥岩; g. 长石沿解理溶蚀形成粒间溶孔及微裂缝, SEM, NYS1 井, 2 340. 95 m, 砂质砾岩; h. 方解石表面溶蚀形成洞穴状孔隙(直径<5 μm), SEM, NYS4 井, 2 392. 00 μm, 钙质细砂岩; i. 伊/蒙混层粘土矿物呈弯片状, 形成不规则状或蜂窝状微孔隙, SEM, NYS1 井, 2 552. 30 m, 砂质泥岩; j. 粒间溶孔(约 50 μm×200 μm), SEM, NYS2 井, 2 307. 80 m, 砂质砾岩; k. 碎屑间胶结物存在微孔隙, SEM, NYS3 井, 2 960. 80 m, 含砾粗砂岩; l. 粒间孔隙, SEM, NYS1 井, 2 337. 40 m, 含钙细砂岩

表 1 部分井下白垩统储层孔隙结构实测参数统计

Table 1 Statistics of measured parameters of pore structure in Lower Crataceous reservoir in partial wells

井名	孔隙度 (%)	渗透率 ($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	中值压力 (MPa)	排驱压力 (MPa)	最大孔喉半径 (μm)	中值孔喉半径 (μm)	样品数
NYS1 井	$\frac{4.2\sim 14.9}{8.08}$	$\frac{0\sim 7.8}{0.38}$	$\frac{4.67\sim 28.48}{13.63}$	$\frac{0.31\sim 19.64}{3.43}$	$\frac{0.037\sim 2.363}{0.66}$	$\frac{0.025\sim 0.516}{0.18}$	40
NYS2 井	$\frac{2.4\sim 11.2}{7.53}$	$\frac{0\sim 6.7}{0.54}$	$\frac{5.38\sim 20.85}{9.36}$	$\frac{0.52\sim 14.72}{3.71}$	$\frac{0.05\sim 1.41}{0.59}$	$\frac{0.03\sim 0.41}{0.18}$	11
NYS3 井	$\frac{2.4\sim 12.0}{4.7}$	$\frac{0.03\sim 46.15}{0.96}$	$\frac{3.15\sim 33.27}{22.75}$	$\frac{0.54\sim 5.33}{1.57}$	$\frac{0.138\sim 3.847}{1.24}$	$\frac{0.022\sim 0.233}{0.066}$	7
NYS4 井	$\frac{1.1\sim 7.5}{5.12}$	$\frac{0.02\sim 0.27}{0.14}$	$\frac{0.21\sim 11.14}{10.28}$	$\frac{0.69\sim 1.40}{1.04}$	$\frac{0.53\sim 1.06}{0.75}$	$\frac{0.21\sim 0.41}{0.29}$	5

注:分子为主要区间值,分母为平均值。

(图 4c、4h、4i)。微裂缝包括成岩及构造破碎两种成因类型,其中成岩成因形成的,多为石英的裂纹缝或长石、方解石的解理缝,多发生在颗粒内部(图 4g),少量泥质岩石脱水形成的微裂隙(图 4f),或砂砾岩因压实作用形成的粒缘缝(图 4d)。构造破碎作用形成的多为穿插石英、长石等颗粒的不规则微裂缝,且有分叉现象(图 4e)。

据多口探井的储层物性、压汞测试资料等分析结果(表 1),储层岩石的最大连通孔喉半径为 $0.037\sim 3.847 \mu\text{m}$,平均 $0.810 \mu\text{m}$,中值孔喉半径为 $0.022\sim 0.516 \mu\text{m}$,平均 $0.180 \mu\text{m}$,孔喉细小,以细孔小喉为主。排驱压力较高,连通性差,分布不甚均匀,孔隙结构总体较差。

4 致密储层成因机制

4.1 沉积作用影响储层物性

沉积作用控制砂体的宏观分布和原始储层物性(王伟东等,2012)。不同的沉积环境,储层具有不同的岩石类型和结构组分特征(李光云等,2013),其经历的成岩演化过程也会存在一定差异,并导致最终各类储层孔隙结构与储集物性的差异(罗静兰等,2014;张创等,2014)。

通过统计不同岩性的实测孔渗资料发现,下白垩统储层整体为特低孔特低渗特征,不同粒度的岩性其孔隙度变化幅度不大,但渗透率略呈粒度越粗越好的趋势(图 5)。造成这一结果的主要原因为:(1)储层主要为扇三角洲分流河道砂体及滨浅湖滩坝砂体,颗粒成分以富含长石和岩屑为主要特征,杂基支撑,泥质含量高,成分及结构成熟度均中等,原始储层物性差。岩屑成分多为流纹岩、凝灰岩、灰岩等,其高含量的塑性组分在成岩过程中易产生强压实作用,发生挤压变形堵塞孔隙,或形成假杂基充填粒间,这均不利于原生孔隙的保存,导致储层整体致密;(2)下白垩统储层为孔隙-一裂缝双孔介质储层,尽管溶蚀孔隙为主要的储集空间,但微裂缝的发育极大地增强了储层的渗透性。渗透率随粒度增粗变好的原因主要与微裂缝的发育程度有关。据薄片资料,粒度由细变粗,微裂缝发育频率相应增高。微裂缝的形成受控于强烈的压实、压溶和构造应力的侧向挤压作用,岩石经过一定程度的成岩作用后,粗颗粒碎屑岩构造应力相对集中,更易发生颗粒破碎,产生裂缝;而细颗粒碎屑岩多表现为压实变形,较少产生微裂缝。因此,研究区扇三角洲分流河道砂体,碎屑颗粒较粗、填隙物较少,微裂缝相对发育,其储层物性略好于滨浅湖滩坝砂体。

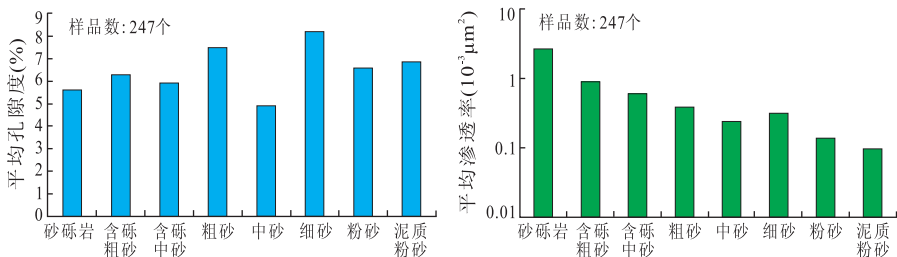


图 5 下白垩统不同岩性的孔渗分布直方图

Fig. 5 Porosity and permeability distribution histogram in different lithology of Lower Crataceous reservoir

4.2 成岩作用主控储层物性

北黄海盆地地下白垩统成岩复杂,控制了最终的储层特征. 目前伊/蒙混层粘土中蒙脱石(S)晶层的含量介于 15%~25%, 镜质体反射率 R_o 为 0.7%~1.3%, T_{max} 大于 400 °C, 多已进入中成岩 A2 阶段. 主要成岩作用类型有压实、胶结、溶蚀和交代等作用, 其中早期强烈压实、后期胶结导致储层整体致密, 矿物的溶蚀和交代作用相对较弱, 但促进了次生孔隙的形成, 为局部相对优质储层的产生创造了条件.

4.2.1 早期强压实、后期胶结导致储层整体致密

薄片观察表明, 下白垩统砂岩岩屑含量较高, 现今的埋深多介于 2 000~4 000 m, 储层普遍经历了强烈的压实作用, 造成流纹岩、泥岩、云母等塑性岩屑的强烈弯曲变形(图 6a), 甚至呈假杂基充填颗粒间; 刚性颗粒破碎(图 6c), 阴极发光下石英、长石的破裂愈合现象比较明显; 碎屑颗粒多呈线状一凸凹接

触(图 6b), 局部见压溶现象, 使储层的孔隙结构发生变化. 据电子探针背散射图像分析, 若将砂岩的原始孔隙度视为 45%, 估算压实作用使孔隙度减少了 25%左右. 强烈的压实作用不仅导致砂岩原生孔隙丧失, 也使后期酸性孔隙水的活动受阻, 不利于次生溶孔的发育, 是储层致密的主要原因.

胶结作用在下白垩统储层中普遍发育, 主要包括: 石英自生加大和方解石的胶结、自生矿物的晶出. 石英的自生加大存在于整个成岩过程, 具普遍性和多期性, 自生加大边形态各异, 厚薄不一(图 6d). 据电子探针背散射图像估算, 石英的多次自身加大使岩石的原始孔隙度减少了 3%. 方解石的胶结主要有 3 种形式: 自生加大边、孔隙中晶出的自形方解石及重结晶方解石(图 6e、6f、6g、6i), 其减孔量约 5%~10%, 胶结作用是导致该区储层岩石孔隙度低的重要因素之一.

自生矿物的晶出减小了岩石的孔隙. 在 60 余件

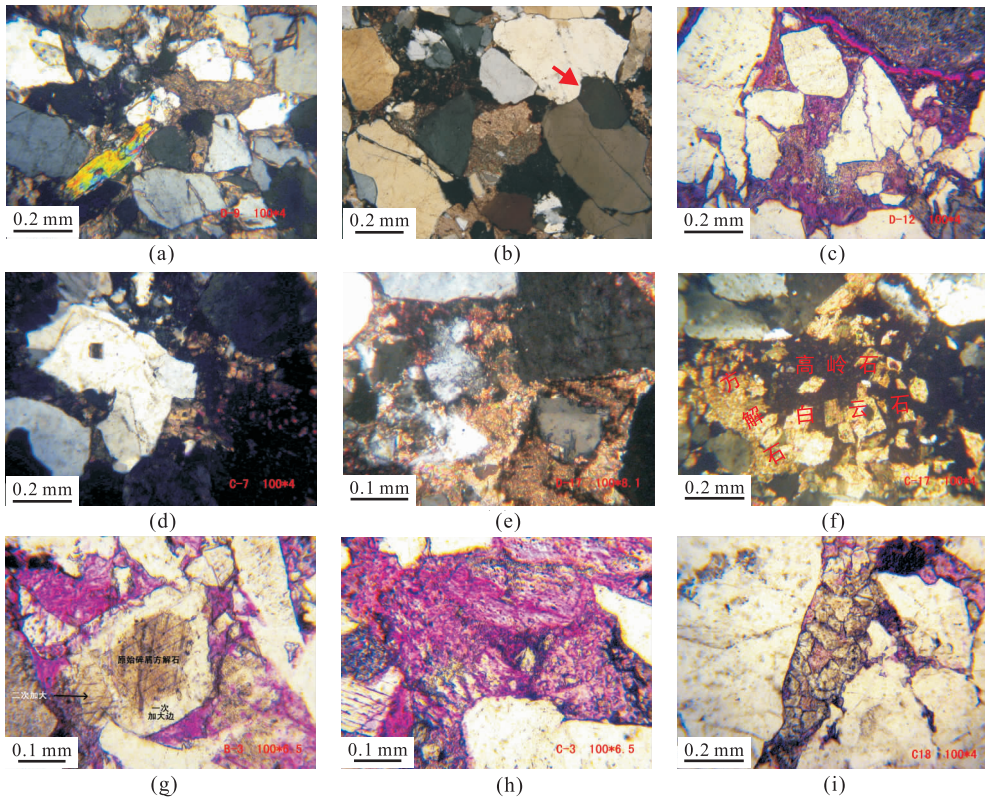


图 6 下白垩统典型成岩现象

Fig. 6 Typical diagenesis of Lower Cretaceous reservoir

a. 颗粒将云母压断, (+), NYS3 井, 3 044. 80 m, 含砾中粗砂岩; b. 颗粒凸凹接触, (+), NYS3 井, 2 961. 50 m, 含砾粗砂岩; c. 刚性颗粒破碎, (-), NYS3 井, 3 048. 50 m, 砾岩; d. 石英次生加大和长石粘土化, (+), NYS1 井, 2 340. 25 m, 长石粗砂岩; e. 方解石重结晶, (+), NYS3 井, 3 081. 80 m, 砾岩; f. 孔隙中自生方解石及白云石晶出, (+), NYS1 井, 2 544. 70 m, 含砾中一粗砂岩; g. 方解石多次自生加大, (-), NYS2 井, 2 295. 10 m, 钙质细一中砂岩; h. 长石高岭土化, (-), NYS1 井, 2 335. 80 m, 含钙中一粗砂岩; i. 孔隙中的自生碳酸盐矿物, (-), NYS1 井, 2 546. 30 m, 砂质砾岩

砂砾岩样品中,其中 41 件存在自生方解石、白云石、菱铁矿等(图 6f),这些自生矿物在岩石中的含量约 3%~5%,自生矿物充填孔隙,堵塞孔喉,造成储层孔隙度和渗透率的进一步降低。

4.2.2 矿物的溶蚀和交代促进次生孔隙的形成

溶蚀作用形成的次生孔隙是研究区下白垩统能够具备有效储层的关键之一。经铸体薄片及扫描电镜观察,被溶蚀的物质主要有长石、岩屑及碳酸盐胶结物。其中,长石的溶蚀和粘土化是增加岩石储集空间的主要因素。长石发生溶蚀,产物一部分被孔隙流体带走形成有效的酸性溶蚀孔隙,另一部分以高岭石胶结的形式析出(唐鑫萍等,2013)。理论计算揭示钾长石被溶蚀时形成的次生孔隙可高达 11.91%(李汶国等,2005),通过对 100 多件样品进行 X 射线分析和显微镜薄片观察表明,岩石中大部分钾长石已高岭石化(图 6h),溶蚀产生的次生孔隙有利于改善储层物性。含油气性统计也表明,高岭石含量高的岩层段,次生溶蚀孔隙相对发育,且有不同程度的油气富集,是下步勘探的潜力层段。

碳酸盐胶结物溶蚀在研究区较为常见,主要为方解石溶蚀,多沿颗粒边缘、双晶缝或解理缝选择性溶蚀,形成粒间溶孔、微裂隙。然而方解石的溶蚀与

重结晶具有重复性和可逆性(黄思静等,2010),镜下方解石重结晶现象明显,多呈自形状镶嵌、充填于岩石骨架颗粒之间(图 6e、6i),对孔隙度的贡献具有两面性,但以负面影响为主。

4.3 后期构造裂隙改善储层物性

后期构造破裂作用产生的裂隙对储层物性尤其是渗透率具有一定的改善作用。研究区岩心及成像测井资料中见少量高角度缝、斜交缝和网状缝等,但早期裂缝多被方解石或泥质充填,现存的少量有效裂缝多为喜山期拉张运动形成的裂缝(王后金等,2014)。裂缝主要作为储层流体的渗流通道,但其内成岩胶结物的存在显著降低了有效渗透率(Olson *et al.*, 2009)。

显微镜下观察到的微裂缝,多为压碎缝,粗粒碎屑岩中较为发育(图 4),开度多在 10~50 μm,分布不规则,可提高基质粒间溶孔和粒内溶孔的连通性,增强储层的渗流能力(郝明强等,2007)。

4.4 储层埋藏史与物性演化密切相关

储层物性与沉积埋藏过程密切相关,同一岩层通过不同的埋藏轨迹达到相同的埋藏终止状态,其孔隙度的保存具较大差异(何小胡等,2010)。早期快速深埋一晚期缓慢埋深或抬升的沉积埋藏过程将有

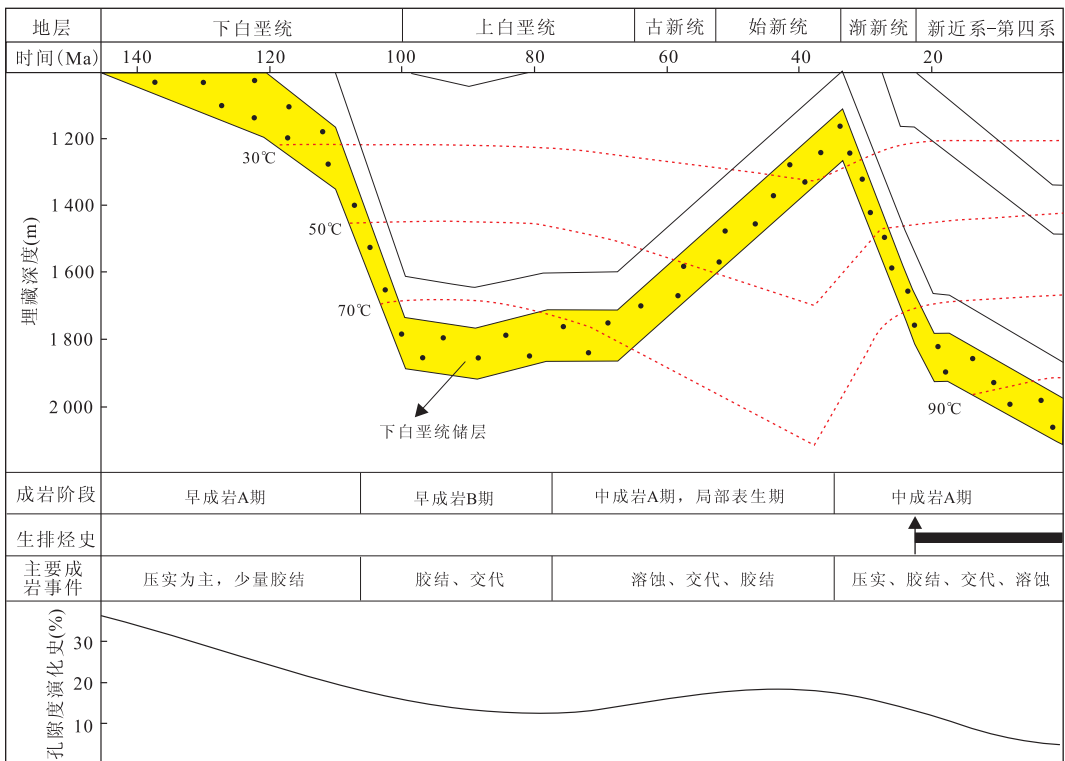


图 7 NYS2 井下白垩统储层埋藏史与孔隙演化

Fig. 7 Burial history and pore evolution of Lower Cretaceous reservoir of Well NYS2

利于地层中孔隙的保存,反之则不利于孔隙的保存 (Umar *et al.*, 2011).

研究区下白垩统储层经历了早期深埋—中期抬升剥蚀—晚期深埋的埋藏史,这一特殊的埋藏过程使其储层经历了复杂的成岩作用.其中,早白垩世 40 多 Ma 期间,沉积速率约 40~90 m/Ma,下白垩统储层底界沉积厚度达 1 500~2 500 m,意味着该次深埋已使储层压实固化成岩,该时期以机械压实作用为主,存在少量石英次生加大等胶结作用,导致整体储层孔隙大幅降低;随后晚白垩世为沉积间断或缓慢剥蚀,胶结、交代作用为主;至古—始新世,地层快速剥蚀,剥蚀厚度达 1 000~1 500 m,残余地层厚度介于 0~1 750 m,处于大气淡水能够影响的范围内.下白垩统整体呈下粗上细的正旋回沉积,部分储层进入表生成岩环境(王强等,2010),受大气淡水的淋滤、溶蚀,上部砂岩储层内形成了一定量的溶蚀孔隙,同时有高岭石沉淀及方解石的重结晶,但储集物性总体得以改善;渐新统及之后的 32 Ma 中,地层再次接受沉积,上覆地层厚度快速持续增加,沉积速率接近 100 m/Ma,迅速达到剥蚀前的埋深,随后继续深埋,最终形成现今的埋藏状态,该时期强烈的压实及胶结作用,导致残余孔隙进一步丧失,使储层形成现今特低孔特低渗的状态(图 7).

油源对比表明,下白垩统储层中的油气主要来自上侏罗统烃源岩(梁世友等,2011).燕山晚期的抬升剥蚀作用严重影响了该烃源岩的热演化,上侏罗统烃源岩主要生排烃期为渐新世末,晚白垩世—始新世的抬升剥蚀之前没有大量生烃和成藏事件发生,包裹体资料表明下白垩统砂岩储层中原油充注时间为早中新世(刘振湖等,2014),揭示研究区属于晚期运聚成藏,下白垩统储层应先致密后成藏.因此,尽管喜山期大量生排烃产生了一定量的有机酸,促使紧邻烃源岩的砂岩储集层溶蚀形成次生孔隙.但经历了长期抬升剥蚀和喜山早期的深埋过程,强烈的压实、胶结作用导致储层致密,油气的输导条件较差,油气难以在砂体中发生大规模长距离运移.因此,烃类排出、运移时间过晚导致研究区酸性流体活动较弱、建设性溶蚀作用相对较差,这是下白垩统储层次生孔隙不太发育的主要原因.

5 结论

(1)北黄海盆地下白垩统储层以扇三角洲沉积为主,物性总体较差,属于特低孔、特低渗的致密砂

岩储层.储集空间主要为粒间溶孔、粒内溶孔、微裂缝,属孔隙—裂缝双孔介质储层.储层孔喉小,孔隙连通性差,孔隙结构复杂.

(2)北黄海盆地下白垩统储层受沉积作用、成岩作用及埋藏史影响.沉积作用是储层致密的先天因素,近源快速堆积的扇三角洲沉积,成分及结构成熟度均中等,使储层初始物性相对较差,塑性岩屑含量高则不利于后期原生孔隙的保存,沉积物粒度影响着微裂缝的发育程度;成岩作用对储层的后期改造起主导作用,目前处于中成岩 A2 阶段,早期强烈压实、后期胶结导致储层整体致密.特别是石英自生加大、方解石胶结、自生矿物晶出等造成储层质量的致命性破坏.矿物的溶蚀和交代,尤其是长石的溶蚀和粘土化,促成了次生孔隙的形成.后期构造裂隙局部改善了储层的渗透性能;早期深埋—中期抬升剥蚀—晚期再次深埋的埋藏史,不仅决定了成岩过程中压实及胶结作用的主导地位,同时也影响着烃类注入储层时间过晚,导致建设性溶蚀作用相对较差,是储层次生孔隙不太发育的主要原因.

致谢:感谢本文两位匿名审稿专家提出的宝贵意见和建议.

References

- Chen, L., Bai, Z. L., Li, W. Y., 2006. The Character of Mid-Cenozoic Sedimental Depression and Oilgas Explorating Direction in North Yellow Sea. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 45(3): 319—323, 18 (in Chinese with English abstract).
- Gao, S. L., Hou, G. W., Tan, S. Z., et al., 2013. Techniques to Predict Dual Porosity Reservoirs with Pores and Fractures and their Application; A Case of the Extra-Low Porous and Permeable Reservoirs in the Target Area, Eastern Depression, North Yellow Sea Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 25(2): 40—45 (in Chinese with English abstract).
- Hao, M. Q., Liu, X. G., Hu, Y. L., et al., 2007. Reservoir Characteristics of Micro-fractured Ultra-low Permeability Reservoirs. *Acta Petrolei Sinica*, 28(5): 93—98 (in Chinese with English abstract).
- He, X. H., Liu, Z., Liang, Q. S., et al., 2010. The Influence of Burial History on Mudstone Compaction. *Earth Science Frontiers*, 17(4): 167—173 (in Chinese with English abstract).
- Huang, S. J., Gong, Y. C., Huang, K. K., et al., 2010. The Influence of Burial History on Carbonate Dissolution and Precipitation—A Case Study from Feixianguan For-

- mation of Triassic, NE Sichuan and Ordovician Carbonate of Northern Tarim Basin. *Advances in Earth Science*, 25(4): 381—390 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. Y., Zeng, X. H., Wang, X. G., et al., 2009. Analysis of Structural Kinematics of North Yellow Sea Basin. *Earth Science Frontiers*, 16(4): 74—86 (in Chinese with English abstract).
- Li, G. Y., Lai, F. Q., He, J. C., et al., 2013. Reservoir Characteristic and Controlling Factors on Physical Properties of Lower Jurassic Tight Sandstone in the Quidong Sub-sag, Turpan-Harmi Basin. *Natural Gas Geoscience*, 24(2): 310—319 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. G., Zhang, X. P., Zhong, Y. M., 2005. Formation Mechanism of Secondary Dissolved Pores in Arcose. *Oil & Gas Geology*, 26(2): 220—223 (in Chinese with English abstract).
- Liang, J., Wen, Z. H., Xiao, G. L., et al., 2013. Reservoir Characteristics and Influential Factors in the Eastern Depression of the North Yellow Sea Basin. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 33(2): 111—119 (in Chinese with English abstract).
- Liang, S. Y., He, J. Q., Ni, C. H., et al., 2011. Oil-source Correlation and Origin Analysis of Mesozoic, North Yellow Sea Basin. *Petroleum Geology and Experiment*, 33(4): 414—418 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. H., Gao, H. F., Hu, X. Q., et al., 2007. A Study on the Mesozoic Petroleum System in East Depression, North Yellow Sea Basin. *China Offshore Oil and Gas*, 19(4): 229—233 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. H., Wang, F. Y., Liu, J. P., et al., 2014. Time of Hydrocarbon Accumulation in Eastern Depression of North Yellow Sea Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 36(5): 550—554 (in Chinese with English abstract).
- Luo, J. L., Liu, X. S., Fu, X. Y., et al., 2014. Impact of Petrologic Components and their Diagenetic Evolution on Tight Sandstone Reservoir Quality and Gas Yield: A Case Study from He 8 Gas-bearing Reservoir of Upper Paleozoic in Northern Ordos Basin. *Earth Science*, 39(5): 537—545 (in Chinese with English abstract).
- Olson, J. E., Laubach, S. E., Lander, R. H., 2009. Natural Fracture Characterization in Tight Gas Sandstones: Integrating Mechanics and Diagenesis. *AAPG Bulletin*, 93(11): 1535—1549. doi: 10.1306/08110909100
- Tang, X. P., Huang, W. H., Li, M., et al., 2013. Diagenetic Environment Evolution of Deep Sandstones in the Upper Es4 of the Palaeogene in Lijin Sag. *Earth Science*, 38(4): 843—852 (in Chinese with English abstract).
- Umar, M., Friis, H., Khan, A. S., et al., 2011. The Effects of Diagenesis on the Reservoir Characters in Sandstones of the Late Cretaceous Pab Formation, Kirthar Fold Belt, Southern Pakistan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(2): 622—635. doi: 10.1016/j.jseas.2010.10.014
- Wang W. D., Peng, J., Duan, G. Y., et al., 2012. Development and Tendency of the Research of Tight Sandstone Gas Reservoirs. *Petroleum Geophysics*, 10(4): 33—38 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H. J., Wang, L. L., Feng, C. M., 2014. On Dynamic Mechanism of Tectonic Evolution in the North Yellow Sea Basin. *Journal of Oil and Gas Technology*, 36(5): 1—7 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Wang, Y. B., Zhang, Y., 2010. Characteristics of the Mesozoic Reservoirs in the Eastern Depression of the Northern Yellow Sea Basin. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 30(4): 97—103 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G. Y., Liu, J. P., Wang, H. J., et al., 2015. Sedimentary Characteristics and Evolution of Mesozoic in the Eastern Depression, North Yellow Sea Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 33(3): 561—567 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H. J., Wang, L. L., Wan, X. M., et al., 2014. Fracture Prediction of Low Permeability Reservoirs of the Mesozoic in North Yellow Sea Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 35(3): 268—272 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, G. L., Sun, C. H., Zheng, J. M., 2005. Pre-Mesozoic Basement Characteristics in the Eastern Depression of the North Yellow Sea Basin. *Geoscience*, 19(2): 261—266 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, C., Sun, W., Gao, H., et al., 2014. Reservoir Diagenetic Facies and Porosity Evolution Pathways of Chang 8 Formation in HuaChi, Ordos basin. *Earth Science*, 39(4): 411—420 (in Chinese with English abstract).
- Zou, C. N., 2011. Unconventional Oil and Gas Geology. Geological Publishing House, Beijing, 50—52 (in Chinese).

附中文参考文献

- 陈玲, 白志琳, 李文勇, 2006. 北黄海盆地中新世代沉积拗陷特征及其油气勘探方向. *石油物探*, 45(3): 319—323, 18.
- 高顺莉, 侯国伟, 谭思哲, 等, 2013. 孔隙—裂缝双孔介质储层预测技术及其应用效果——以北黄海盆地东部拗陷目标区特低孔特低渗储层为例. *中国海上油气*, 25(2): 40—45.

- 郝明强,刘先贵,胡永乐,等,2007. 微裂缝性特低渗透油藏储层特征研究. 石油学报,28(5): 93—98.
- 何小胡,刘震,梁全胜,等,2010. 沉积地层埋藏过程对泥岩压实作用的影响. 地学前缘(中国地质大学(北京);北京大学),17(4): 167—173.
- 黄思静,龚业超,黄可可,等,2010. 埋藏历史对碳酸盐溶解—沉淀的影响——以四川盆地东北部三叠系飞仙关组和塔里木盆地北部奥陶系为例. 地球科学进展,25(4): 381—390.
- 李光云,赖富强,何加成,等,2013. 吐哈盆地丘东洼陷下侏罗统致密砂岩储层特征及物性主控因素. 天然气地球科学,24(2): 310—319.
- 李文勇,曾祥辉,王信国,等,2009. 北黄海盆地构造运动学解析. 地学前缘,16(4): 74—86.
- 李汶国,张晓鹏,钟玉梅,2005. 长石砂岩次生溶孔的形成机理. 石油与天然气地质,26(2): 220—223.
- 梁杰,温珍河,肖国林,等,2013. 北黄海盆地东部坳陷储层特征及影响因素. 海洋地质与第四纪地质,33(2): 111—119.
- 梁世友,何将启,倪春华,等,2011. 北黄海盆地中生界油源对比及成因分析. 石油实验地质,33(4): 414—418.
- 刘振湖,高红芳,胡小强,等,2007. 北黄海盆地东部坳陷中生界含油气系统研究. 中国海上油气,19(4): 229—233.
- 刘振湖,王飞宇,刘金萍,等,2014. 北黄海盆地东部坳陷油气成藏时间研究. 石油实验地质,36(5): 550—554.
- 罗静兰,刘新社,付晓燕,等,2014. 岩石学组成及其成岩演化过程对致密砂岩储集质量与产能的影响:以鄂尔多斯盆地上古生界盒 8 天然气储层为例. 地球科学,39(5): 537—545.
- 唐鑫萍,黄文辉,李敏,等,2013. 利津洼陷沙四上亚段深部砂岩的成岩环境演化. 地球科学,38(4): 843—852.
- 王改云,刘金萍,王后金,等,2015. 北黄海盆地东部坳陷中生界沉积特征及演化. 沉积学报,33(3): 561—567.
- 王后金,王嘹亮,冯常茂,2014. 北黄海盆地的成盆动力学机制探讨. 石油天然气学报,36(5): 1—7.
- 王后金,王嘹亮,万晓明,等,2014. 北黄海盆地中生界低渗储集层裂缝预测. 新疆石油地质,35(3): 268—272.
- 王强,王应斌,张友,2010. 北黄海东部坳陷中生界储层特征. 沉积与特提斯地质,30(4): 97—103.
- 王伟东,彭军,段冠一,等,2012. 致密砂岩气藏储层研究的进展及趋势. 油气地球物理,10(4): 33—38.
- 肖国林,孙长虹,郑浚茂,2005. 北黄海盆地东部前中生界基底特征. 现代地质,19(2): 261—266.
- 张创,孙卫,高辉,等,2014. 鄂尔多斯盆地华池长 8 储层成岩相与孔隙度演化. 地球科学,39(4): 411—420.
- 邹才能,2011. 非常规油气地质. 北京:地质出版社,50—52.