



## 北黄海盆地东部坳陷中生界次生孔隙的发育规律

高 丹, 程日辉, 沈艳杰, 候世林, 付秋林, 王嘹亮

### Development of Mesozoic secondary pore zones in the Eastern Depression of North Yellow Sea Basin

GAO Dan, CHENG Rihui, SHEN Yanjie, HOU Shilin, FU Qiulin, and WANG Liaoliang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2020121601>

---

#### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### [北康盆地基底卷入断层特征及其对南海南部构造演化的启示](#)

Features of the basement-involved faults in the Beikang Basin and their implications for the tectonic evolution of the southern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(4): 116



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020121601

# 北黄海盆地东部坳陷中生界次生孔隙的发育规律

高丹<sup>1,2</sup>, 程日辉<sup>3</sup>, 沈艳杰<sup>3</sup>, 侯世林<sup>1,2</sup>, 付秋林<sup>4</sup>, 王嘹亮<sup>5</sup>

1. 沈阳师范大学古生物学院, 沈阳 110034
2. 自然资源部东北亚古生物演化重点实验室, 沈阳 110034
3. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061
4. 辽宁省地质矿产研究院有限责任公司, 沈阳 110000
5. 广州海洋地质调查局, 广州 510075

**摘要:** 北黄海盆地东部坳陷中生界储层以特低孔、超低渗型为主, 对本区次生孔隙的研究是寻找优质储层和有利油气聚集区的重要内容, 对油气勘探有重要意义。利用钻井、岩心和物性资料分析, 采用岩石薄片鉴定, 阴极发光和扫描电镜等方法, 对北黄海盆地东部坳陷储层的岩石类型、孔渗特征以及孔隙类型进行研究, 确定了次生孔隙带的发育规律及其影响因素。研究认为本区次生孔隙的发育除受到成岩作用因素影响外, 还受到物质成分、沉积相带、地层不整合和构造裂隙等因素的控制。其中, 沿地层不整合风化界面和大断裂的淋滤作用是形成次生孔隙、改善储层物性的重要因素。综合分析认为, 研究区中部地区地层不整合界面附近是有利的次生孔隙带发育位置。

**关键词:** 次生孔隙带; 不整合; 北黄海盆地; 中生界

**中图分类号:** P736.21      **文献标识码:** A

## Development of Mesozoic secondary pore zones in the Eastern Depression of North Yellow Sea Basin

GAO Dan<sup>1,2</sup>, CHENG Rihui<sup>3</sup>, SHEN Yanjie<sup>3</sup>, HOU Shilin<sup>1,2</sup>, FU Qiulin<sup>4</sup>, WANG Liaoliang<sup>5</sup>

1. College of Palaeontology, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China
2. Key-Lab of Evolution of Past Life in NE Asia, Ministry of Natural Resources of China, Shenyang 110034, China
3. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China
4. Institution of Geological & Mineral Survey of Liaoning, Shenyang 110000, China
5. Guangzhou Bureau of Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China

**Abstract:** The Mesozoic reservoirs in the Eastern Depression of North Yellow Sea Basin are commonly characterized by very low porosity and permeability. The most important task in the exploration of oil and gas of the basin is to study the secondary pores for finding the high quality reservoirs and favorable hydrocarbon accumulation areas. Combining the drilling, cores and physical property data, using the methods of thin section identification, cathodoluminescence and scanning electron microscope, characteristics of porosity and permeability and pore types are studied in this paper. Secondary pore zones and their influencing factors are discussed. It is found that the development of secondary pores is influenced not only by diagenesis, but also by the material composition, sedimentary facies, stratigraphic unconformity, and structural fractures. The eluviations along the stratigraphic unconformities, weathering surfaces and faults are the most important factors for the formation of secondary pore and improvement of reservoir properties. In sum, the favorable position for the secondary pores is always close to the unconformity surfaces in the middle Eastern Depression of the North Yellow Sea Basin.

**Key words:** secondary pore zone; unconformity; North Yellow Sea Basin; Mesozoic

北黄海盆地是中国近海含油气盆地之一, 其独特的大地构造位置和复杂的油气地质特征, 使其得到广泛关注。中、朝双方已在该区开展了一些地质、地球物理和油气勘探工作, 认为中生界是有利

的油气勘探层<sup>[1-2]</sup>, 并在东部坳陷的侏罗系和白垩系获工业油流<sup>[3-4]</sup>, 然而, 一些钻探的实施并没有显著的油气突破。分析认为, 东部坳陷的中生界厚度大, 烃源岩条件好<sup>[2]</sup>, 具有良好的油气勘探前景<sup>[5-6]</sup>。

资助项目: 沈阳师范大学博士科研启动基金 (BS202012, BS202011)

作者简介: 高丹 (1990—), 女, 博士, 讲师, 主要从事沉积学与储层地质学研究, E-mail: realiris@sina.com

通讯作者: 程日辉 (1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事石油地质学研究, E-mail: Chengrh@jlu.edu.cn

收稿日期: 2020-12-16; 改回日期: 2021-03-02. 周立君编辑

因此, 寻找优质储层和有利的成藏位置是油气勘探的重要问题。已有研究认为, 东部拗陷中生界储层物性总体欠佳, 对油气产能影响较大<sup>[7-9]</sup>。随着研究工作的不断进展, 笔者认为, 对次生孔隙成因和次生孔隙带分布的探讨是确定优质储层的核心问题。

本文通过对研究区钻井的岩心观察及砂岩样品的岩石薄片(包括铸体薄片)镜下鉴定, 运用阴极发光、扫描电镜等方法, 结合孔渗数据的分析, 研究储层的基本特征及其孔隙类型, 分析次生孔隙的发育规律和控制因素, 预测次生孔隙带, 寻找优质储层, 为油气勘探提供依据。

## 1 区域地质背景

北黄海盆地位于中国黄海海域的北部(图 1a), 是一个发育在中朝地台基底之上的中—新生代沉积盆地<sup>[10]</sup>, 地理上位于山东半岛、辽东半岛和朝鲜半岛之间, 构造上属于中朝板块的东南部, 为华北地台向东部海域延伸的部分, 东邻朝鲜北部狼林地块, 与朝鲜安州盆地相接, 南部为苏鲁-临津江造山带(下扬子板块与中朝板块碰撞带)<sup>[11]</sup>, 西为郯庐断裂和渤海湾盆地, 北部为辽东隆起。北黄海盆地发育东部拗陷、中部拗陷、西部拗陷、南部凹陷群、中央隆起和中西部隆起等 6 个二级构造单元<sup>[12-13]</sup>, 其中, 东部拗陷是北黄海盆地内面积最大、最主要的一个沉积拗陷, 也是北黄海盆地内唯一发现油流的沉积拗陷<sup>[14-15]</sup>, 为目前勘探的重点区。

东部拗陷构造演化经历了晚侏罗世—早白垩世裂陷、晚白垩世—古新世构造反转、始新世—渐

新世裂陷、晚渐新世—早中新世构造反转及中中新世—第四纪区域沉降 5 个阶段<sup>[16]</sup>。中生界为一套河湖相碎屑岩沉积, 中、上侏罗统构成了最主要的生烃层系, 储层主要为下白垩统和上侏罗统的碎屑岩<sup>[14-19]</sup>。多期构造演化导致本区地质构造复杂, 形成多个凹陷和凸起(图 1b)。其中, 中部凹陷是主要的生烃凹陷, 中 II 构造带及其附近区域(中部地区)和中部凸起倾末端及其附近区域(东部地区)是有利的储层发育位置, 也是主要钻井区, 但因白垩纪后期的强烈抬升和严重剥蚀, 以及来源于东部火山活动的火山灰, 形成了本区“有藏无效, 有储不良”的致密砂岩型储层<sup>[20]</sup>。目前在中部地区钻井 5 口, 东部地区钻井 2 口, 并取得了详细的岩心资料, 较为完整地揭示了东部拗陷重点勘探区中生界的岩性、岩相特征, 为本文研究提供了可靠基础。

## 2 储层基本特征

### 2.1 岩石类型

本区储层岩石类型以细砂岩、粗砂岩和砂砾岩为主, 有少量中砂岩和粉砂岩。岩性以岩屑石英砂岩、岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩为主, 其次为岩屑砂岩和长石石英砂岩。骨架颗粒中, 石英含量为 20%~85%, 长石含量 5%~35%, 岩屑含量 5%~70%。岩屑类型以花岗岩屑、流纹岩屑及凝灰岩屑为主, 其次为安山岩屑, 有少量的沉积岩屑。砂岩分选—差, 颗粒磨圆—差, 多为次圆—棱角状, 颗粒间以线接触关系为主。杂基平均含量为 15%, 以凝灰质和

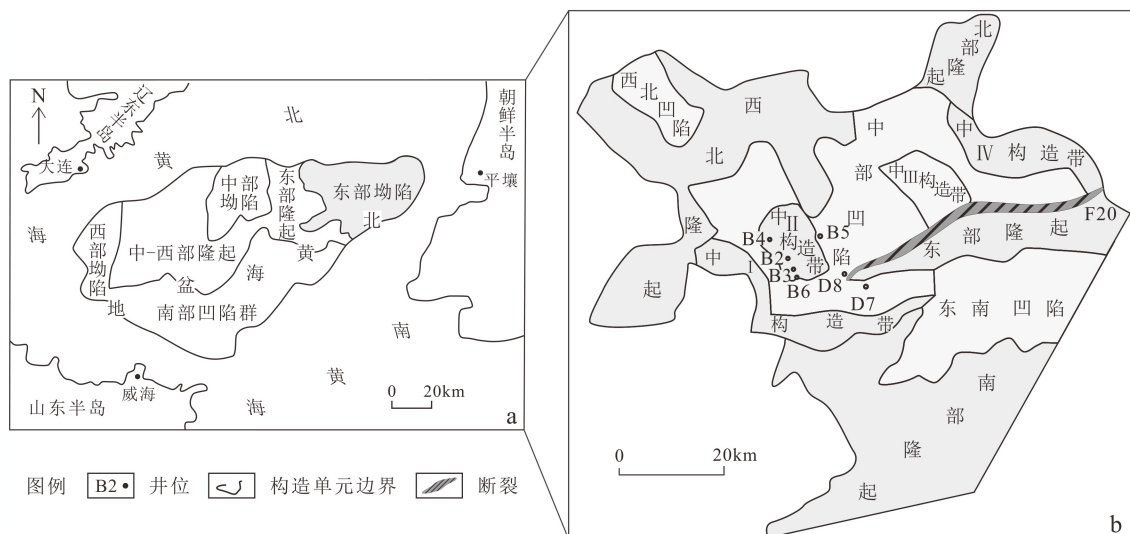


图 1 北黄海盆地东部拗陷钻井地理位置

Fig.1 Sketch map showing the locations of drilling wells in the Eastern Depression, North Yellow Sea Basin

黏土矿物为主。胶结物平均含量 10%，主要为碳酸盐和硅质等，为孔隙式胶结。

受不同方向物源的影响，东部拗陷碎屑岩物质成分存在明显的分区性，表现为东部地区的岩屑含量较高，主要为岩屑砂岩和长石岩屑砂岩，填隙物以凝灰质为主。中部地区的石英、长石含量相对较高，以岩屑石英砂岩、长石石英砂岩和岩屑长石砂岩为主，填隙物以碳酸盐胶结物和黏土矿物为主，发育有少量凝灰质。总的来说，中部地区整体表现为一套成分和结构成熟度中等的碎屑岩；东部地区为结构和成分成熟度相对偏低的碎屑岩。

## 2.2 孔渗特征

研究区岩心物性分析表明，储层孔隙度为 0.2%~18%，平均值为 6.7%。根据石油行业储层孔隙度分析标准(SY/T6285-1997)，对本区的孔隙度分布频率进行统计，结果显示研究区中生界砂岩储层孔隙度主要为 5%~10%，约占分析样品的 53.33%。属于特低孔；其次分布于 <5% 的区间，占分析样品的 32.9%，属于超低孔；孔隙度为 10%~15% 的样品占 13.12%，属于低孔；孔隙度 15%~25% 的样品仅占 0.65%，总体表现为以特低孔为主，超低孔为辅的特征。

储层渗透率分布于  $(0.002 \sim 16.1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，平均值为  $0.45 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。对岩心的渗透率频率分布结果显示，研究区中生界砂岩储层渗透率分布于  $(0.1 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的样品最多，占分析样品的 47.53%，属于超低渗；小于  $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的非渗储层所占比例为 44.73%；渗透率为  $(1 \sim 10) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的样品所占比例为 7.1%，属于特低渗；渗透率分布于  $(10 \sim 50) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的样品所占比例为 0.65%，属于低渗。总体表现为以超低渗为主，同时含较多非渗层的特点。

综合分析显示，东部拗陷以特低孔、超低渗致密砂岩型储层为主。

## 2.3 孔隙类型

根据岩心、铸体薄片和扫描电镜等分析研究，中生界储层孔隙可分为原生孔隙、次生孔隙和裂缝(表 1)。

本区仅残留少量未被压实原生孔隙(图 2a)，发育在较浅的地层中，包括粒间孔和杂基微孔隙，粒间孔主要为胶结作用剩余的孔隙，杂基微孔隙主要包括原生黏土矿物晶间孔(图 2b)和凝灰质填隙物内孔(图 2c)。本区的残余原生孔隙多细小，且零星分布，主要发育在埋藏较浅的地层中，含量极少，不具有连通性，不能作为有效的储集空间。

表 1 北黄海盆地东部拗陷中生界储层孔隙类型及特征  
Table 1 The Mesozoic reservoir porosity types and characteristics in the Eastern Depression, the North Yellow Sea Basin

孔隙类型	特征
原生孔隙	粒间孔 胶结作用剩余孔隙
	杂基微孔隙 黏土矿物晶间孔、凝灰质填隙物孔
次生孔隙	粒间溶孔 粒间填隙物溶蚀
	粒内溶孔 石英、长石粒内溶蚀
	微收缩孔 矿物蚀变、凝灰质脱玻化
裂缝	碎屑颗粒表面破裂缝、构造裂隙

次生孔隙是本区主要的孔隙类型，是本区的主要储集空间，也是本区优质储层发育的有利孔隙类型，包括粒间溶孔、粒内溶孔和微收缩孔。

粒间溶孔包括碎屑颗粒的边缘被溶解以及颗粒间填隙物溶解而形成的孔隙，表现为石英和长石等碎屑颗粒边缘的港湾状溶蚀孔，凝灰质中易溶组分、同沉积碳酸盐胶结物和碳酸盐交代其他填隙物后发生溶蚀-溶解作用形成的孔隙(图 2d)。

粒内溶孔是岩石中骨架颗粒的溶蚀-溶解作用形成的孔隙，包括石英、长石和岩屑在不同条件下的溶蚀溶解(图 2e)，还包括碳酸盐矿物交代颗粒后被溶解而形成的孔隙(图 2f)。部分岩石中的粒内孔可与粒间孔相连，孔隙间具有一定的连通性。微收缩孔主要为矿物的蚀变作用(图 2g)和凝灰质脱玻化作用形成的孔隙，这类孔隙通常较小。

裂缝也是改善本区储层物性的重要孔隙类型，常见的为颗粒表面的破裂缝(图 2h)，由于本区强烈的构造活动导致岩石发生破碎而形成的裂缝。

## 3 次生孔隙带发育规律

本区以特低孔、超低渗的致密砂岩型储层为主，原生孔隙大量丧失，次生孔隙作为主要的储集空间，其发育程度和连通性是影响储层发育的重要内容，次生孔隙及其发育带是优质储层发育的有利场所。

纵向上，本区次生孔隙主要集中于 2000~3700 m 深度内，不同钻井的次生孔隙发育深度和孔隙的发育数量略有不同，具体发育位置见图 3。基本特征表现为：厚层砂岩中较发育；各钻井在地层分界处(即中侏罗统和上侏罗统分界处及上侏罗统和下白垩统分界处)孔隙度值较高，是次生孔隙发育的主要位置。

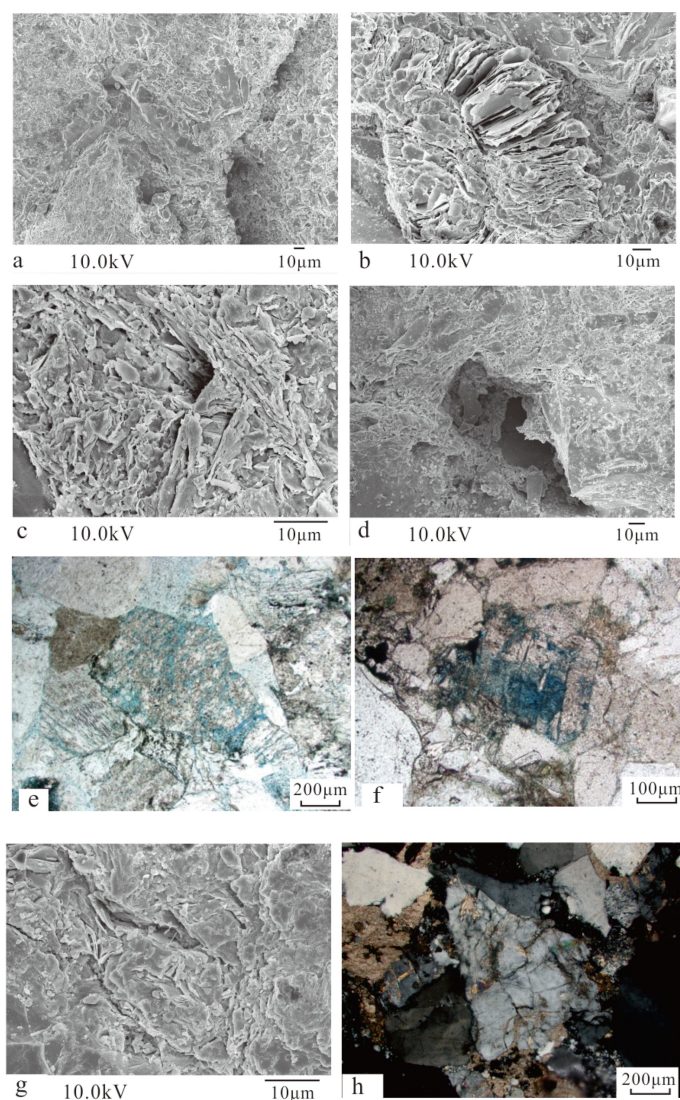


图 2 孔隙类型

a. B5 井 3 360.7 m 粒间残余原生孔隙; b. B4 井 2 220.17 m 高岭石晶间孔; c. D7 井 2 014.74 m 凝灰质填隙物间孔; d. B6 井 3 043.02 m 钙质胶结溶蚀孔; e. B3 井 2 421.43 m 长石粒内溶孔(蓝色为孔隙); f. B6 井 3 045.82 m 方解石溶解(蓝色为孔隙); g. B6 井 3 043.02 m 蚀变收缩孔(长石蚀变为高岭石); h. B4 井 2221.62 m 长石表面破裂缝。

Fig.2 The types of pore

a. Well B5 3 360.7 m: Intergranular residual primary pore; b. Well B4 2 220.17 m: Intercrystalline Pore of Kaolinite; c. Well D7 2 014.74 m: Tuffaceous interstitial pore; d. Well B6 3 043.02 m :Solution pore of calcareous cementation; e. Well B3, 2 421.43 m: Dissolved Pores( blue pores) in feldspar grains; f. Well B6, 3 045.82 m: Calcite dissolution( blue pores); g. Well B6 3 043.02 m: Altered shrinkage pores( Feldspar altered to Kaolinite); h. Well B4 2 221.62 m: Surface crack of feldspar.

平面上, 不同地区的次生孔隙发育程度也存在差异, 中部地区次生孔隙的发育程度要好于东部地区(图 4), 具体特征如下: 中部地区钻井多且层位发育齐全, 砂层厚度较大, 孔隙度高值点较多, 位于构造高位的 B2、B3 和 B6 井次生孔隙发育程度要好于其他钻井, 岩性以细砂岩—粗砂岩为主, 且砂体连通性较好, 可形成有效的次生孔隙发育带, 是本区优质储层发育的主要场所。而东部地区次生孔隙发育层位砂层厚度相对较小, 如图 4 中 D7 和

D8 两口井所示, 东部地区中生界地层深度相差较大, 且各粒级岩性均有发育, 常含泥质, 孔隙度值偏低, 次生孔隙发育程度低, 砂体连通性差, 未形成次生孔隙带。

根据本区各钻井的发育位置及次生孔隙的发育规律, 认为中部地区各井地层不整合处的次生孔隙可相互连通形成次生孔隙带(图 4), 即中部地区地层不整合风化界面附近是有利的次生孔隙带发育位置, 为有利的油气储集层。

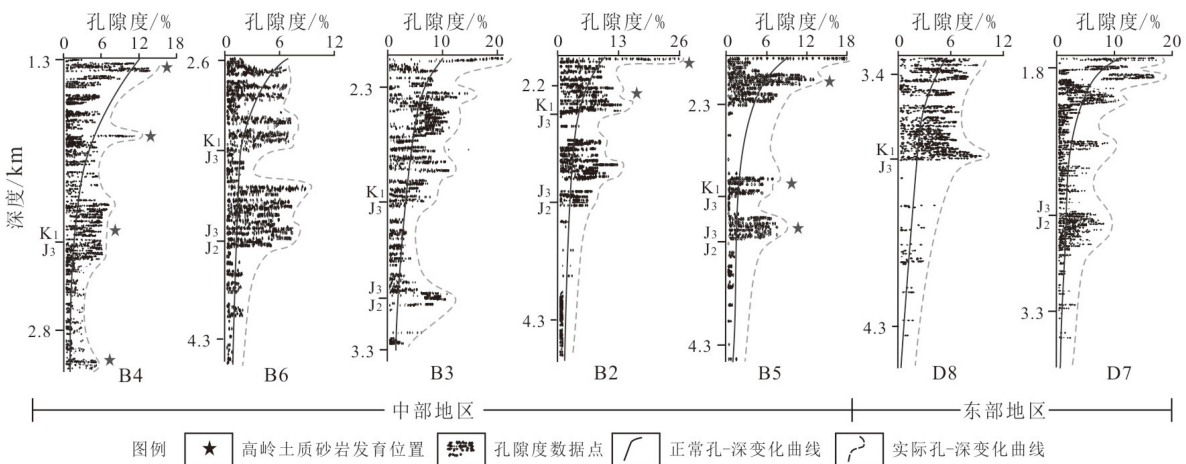


图3 各井孔隙度随深度演化曲线及次生孔隙发育特征

Fig.3 Variation of porosity with depth and developmental characteristics of secondary pores

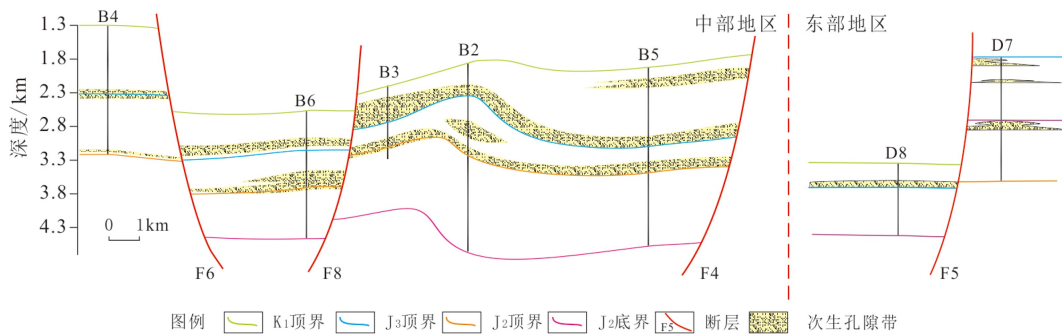


图4 次生孔隙带分布图

Fig.4 Distributions of secondary pore zone

### 4 次生孔隙发育的影响因素

本区次生孔隙带的发育是油气成藏的主要因素之一。次生孔隙带的形成与沉积作用、成岩作用和构造作用有密切关系,是各因素共同作用的结果。次生孔隙作为主要的储集空间,次生孔隙带是重要的油气运移通道。

#### 4.1 沉积因素

东部拗陷的沉积受多方向物源的影响,物源-沉积体系的发育为储层发育提供了物质基础。东部地区有较强的火山活动,样品中岩屑占优势,火山碎屑含量较高。岩屑(尤其是火山岩屑)抗压实能力弱,易发生变形使储层物性降低。杂基中大量的凝灰质堵塞孔隙,降低孔隙度。东部的火山活动影响范围较大,中部地区同样受到了一定的影响,为空落火山灰,充填于孔隙中。但中部地区的沉积主要受西南部和北部风化物源控制<sup>[21]</sup>,石英含量较高,抗压能力要强于东部,储层物性较好。来自于

北部物源的沉积物有大量灰岩或碳酸盐矿物,以胶结物形式充填在孔隙中,降低了孔隙度,但却保留了原始粒间孔隙框架。岩屑、长石、凝灰质和钙质为次生孔隙的形成奠定了物质基础。在溶蚀、溶解作用下,这些易变、易溶组分发生溶蚀、溶解便可形成次生孔隙。

砂层中同沉积的钙质和凝灰质等细粒填隙物充填于骨架颗粒间,中部地区以钙质胶结为主,东部地区以凝灰质胶结为主。这些填隙物的存在堵塞了原始的孔隙空间,同时支撑了孔隙的空间格架,在溶蚀、溶解等作用发生时,便会释放空间,形成次生孔隙,改善储层物性。

#### 4.2 构造作用

早在20世纪90年代,地质学家就已经注意到了近地表暴露和淡水淋滤作用对砂岩物理性质的影响<sup>[22-24]</sup>。已有研究显示,上侏罗统的底界面为燕山构造运动I—II幕界面(朝鲜:大宝运动)、上侏罗统与下白垩统的分界面为燕山构造运动III幕界面(朝鲜:载宁运动)<sup>[25]</sup>。大规模的构造运动导致了

中生界断裂构造的发育以及上侏罗统和下白垩统底部不整合的形成。在致密砂岩中大断裂和地层不整合作为流体运移的通道, 其附近是形成次生孔隙的有利位置。本区侏罗系和白垩系不整合处砂层的淋滤溶蚀作用极为发育, 在风化界面附近形成大面积的次生孔隙, 尤其是中部地区, 是有利的次生孔隙带发育区。在地层不整合风化界面处(即上侏罗统底部和下白垩统底部)存在孔隙度异常高点(图 3), 结合岩心样品的镜下鉴定结果显示, 孔隙类型以次生溶蚀孔为主(图 2d、2e、2f)。

同时沿断裂的淡水淋滤作用对储层也有一定的改善作用, 中部地区高岭土质砂岩的发育证实了断层附近淋滤溶蚀作用的发生。因此构造作用的发生对储层有一定的改善作用。断裂活动使地层中形成裂缝型孔隙, 与断裂一起成为大气降水注入地下的通道, 通过淋滤溶蚀作用形成次生孔隙。F4 是研究区北部的一个在中生代持续活动的大断裂, 其反转控制了断块抬升和剥蚀。受 F4 影响的钻井为 B4、B2、B5, 均发育有大量的高岭土质砂岩(图 3), 高岭土是偏酸条件下淋滤蚀变作用的产物, 高岭土质砂岩层的孔隙度高于其他岩层, B2 井中高岭土质砂岩孔隙度最高达 25.56%。

### 4.3 成岩因素

在全球很多沉积盆地的碎屑岩储层中, 随着埋深的增加和原生孔隙的丧失, 次生孔隙成为主要的油气储集空间<sup>[26]</sup>, 而次生孔隙的发育与成岩过程中不稳定矿物的溶蚀、溶解作用有关<sup>[27-29]</sup>。本区成岩过程中有机酸对矿物的溶解作用对次生孔隙发育有极大的贡献。东部坳陷中侏罗统和上侏罗统的暗色泥岩为烃源岩的主要来源。中侏罗统烃源岩生烃母质以陆源高等植物为主, 有机碳含量中等, 以 III 型干酪根为主; 上侏罗统烃源岩生烃母质为高等植物和低等水生生物混杂, 兼有 II 型和 III 型干酪根, 局部发育有机碳含量高、氢指数平均为 500 mg/gTOC 的良好烃源岩<sup>[14]</sup>。这两套烃源岩分别在中侏罗世和早白垩世早期进入生烃门限, 开始生油<sup>[1]</sup>。前人实验研究表明, 当地温为 80~120 °C 时, 烃源岩中的干酪根会发生热裂解作用, 脱去外部的含氧官能团, 形成大量的有机酸, 这些可溶性有机酸随孔隙流体运移到储集层中, 促进了砂层中铝硅酸盐和碳酸盐等酸溶物质的溶解, 从而形成次生孔隙<sup>[30-32]</sup>。碳酸盐矿物的溶解对本区次生孔隙形成有主要的贡献作用。在酸性水体中, 砂层中的钙质极易发生溶解, 形成次生孔隙。中部地区大量的碳酸盐胶结

物是其形成次生孔隙最为重要的物质基础。东部地区乃至整个盆地都受到凝灰质的影响, 凝灰质的脱玻化-重结晶作用会形成微收缩孔隙。同时本区凝灰质多为空落成因或未经长距离的搬运, 不稳定成分较多, 易发生溶蚀作用形成次生孔隙。本区含量较高的长石也是次生孔隙发育的物质基础。在酸性条件下, 长石溶蚀作用普遍发育。例如, 在不受外界影响的情况下, 单位体积的长石在酸性条件下发生溶解, 孔隙度的增加率为 4.07%~13.56%<sup>[33]</sup>, 可见长石的蚀变、溶蚀作用可形成次生孔隙。本区的碳酸盐矿物溶解、凝灰质脱玻化(重结晶-蚀变)-溶蚀及岩屑-长石等易变、易溶组分溶蚀是形成次生孔隙的主要成岩作用。

综合比较, 中部地区次生孔隙发育程度要好于东部地区, 是有利的油气储集区。构造、沉积、成岩综合的孔隙度分析是预测次生孔隙带的重要方法。除了储层外, 油气在生成、运移、聚集和保存的过程中还受到其他多方面因素的影响, 因此在实际工作中应将各因素综合考虑, 以利于油气的勘探。

## 5 结论

(1) 北黄海盆地东部坳陷储层以特低孔—超低渗型为主, 中部地区碎屑岩的成熟度要高于东部地区。

(2) 次生孔隙是主要的储集空间, 影响次生孔隙发育的因素包括沉积作用、成岩作用和构造作用。大断裂和地层不整合附近是次生孔隙发育的有利位置。

(3) 次生孔隙带发育在中部地区, 发育位置为侏罗系和白垩系地层不整合风化界面附近。

**致谢:** 感谢广州海洋地质调查局对本文研究工作给予的大力支持。

### 参考文献 (References)

- [1] 刘振湖, 高红芳, 胡小强, 等. 北黄海盆地东部坳陷中生界含油气系统研究[J]. 中国海上油气, 2007, 19(4): 229-233. [LIU Zhenhu, GAO Hongfang, HU Xiaoqiang, et al. A study on the Mesozoic petroleum system in East Depression, North Yellow Sea basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2007, 19(4): 229-233.]
- [2] 陈玲, 白志琳, 李文勇. 北黄海盆地中生代沉积坳陷特征及其油气勘探方向[J]. 石油物探, 2006, 45(3): 319-323. [CHEN Ling, BAI Zhilin, LI Wenyong. The character of Mid-Cenozoic sedimental depression and oil-gas exploring direction in North Yellow Sea [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2006, 45(3): 319-323.]
- [3] 蔡乾忠. 横贯黄海的北中朝造山带与北、南黄海成盆成烃关系[J]. 石

- 油与天然气地质, 2005, 26(2): 185-192, 196. [CAI Qianzhong. Relationship between Sino-Korean orogenic belt traversing Yellow Sea and basin evolution and hydrocarbon generation in North and South Yellow Sea basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(2): 185-192, 196.]
- [4] 王强, 王应斌, 张友. 北黄海中生代残留盆地砂岩成岩作用及其对孔隙的影响[J]. 海洋地质前沿, 2011, 27(8): 16-25. [WANG Qiang, WANG Yingbin, ZHANG You. Sandstone diagenesis in Mesozoic residual basin of North Yellow Sea and its impact on porosity [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2011, 27(8): 16-25.]
- [5] 金仁植, 费琪, 杨香华, 等. 北黄海盆地含油气系统与勘探前景[J]. 石油实验地质, 2006, 28(5): 445-449, 457. [Kim in Sik, FEI Qi, YANG Xianghua, et al. The petroleum system and exploration prospect in the east of North Yellow Sea basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2006, 28(5): 445-449, 457.]
- [6] Gong J M, Wen Z H, Chen J W, et al. Geologic characteristics and hydrocarbon-generating potential of Mesozoic strata in the North Yellow Sea basin [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2000, 20(2): 69-78.
- [7] 王强, 王应斌, 张友. 北黄海东部拗陷中生界储层特征[J]. 沉积与特提斯地质, 2010, 30(4): 97-103. [WANG Qiang, WANG Yingbin, ZHANG You. Characteristics of the Mesozoic reservoirs in the eastern depression of the Northern Yellow Sea basin [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2010, 30(4): 97-103.]
- [8] 梁杰, 温珍河, 肖国林, 等. 北黄海盆地东部拗陷储层特征及影响因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(2): 111-119. [LIANG Jie, WEN Zhenhe, XIAO Guolin, et al. Reservoir characteristics and influential factors in the Eastern Depression of the North Yellow Sea basin [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33(2): 111-119.]
- [9] 梁杰, 温珍河, 肖国林, 等. 热液作用对北黄海盆地东部拗陷中生界储层的影响[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(5): 117-123. [LIANG Jie, WEN Zhenhe, XIAO Guolin, et al. The impact of hydrothermal activity on the reservoirs in the East Depression of the North Yellow Sea basin [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2015, 35(5): 117-123.]
- [10] 蔡乾忠. 黄海含油气盆地区域地质与大地构造环境[J]. 洋地质动态, 2002, 18(11): 8-12. [CAI Qianzhong. Regional geology and geotectonic environment of petroliferous basins in the Yellow Sea [J]. *Marine Geology Letters*, 2002, 18(11): 8-12.]
- [11] 郑求根, 蔡立国, 丁文龙, 等. 黄海海域盆地的形成与演化[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(5): 647-654. [ZHENG Qiugen, CAI Ligu, DING Wenlong, et al. Development and evolution of basins in Yellow Sea [J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(5): 647-654.]
- [12] 李文勇, 李东旭, 夏斌, 等. 北黄海盆地构造演化特征分析[J]. 现代地质, 2006, 20(2): 268-276. [LI Wenyong, LI Xudong, XIA Bin, et al. Characteristics of structural evolution in North Yellow Sea basin [J]. *Geoscience*, 2006, 20(2): 268-276.]
- [13] 吴淑玉, 刘俊, 肖国林, 等. 匹配追踪算法频谱分解的碎屑岩薄砂体储层预测——以北黄海盆地东部拗陷下白垩统为例[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, 37(3): 197-207. [WU Shuy, LIU Jun, XIAO Guolin, et al. Thin clastic sand reservoir prediction based on matching pursuit spectrum decomposition-A case of Eastern Depression of North Yellow Sea basin [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2017, 37(3): 197-207.]
- [14] 刘金萍, 王改云, 杜民, 等. 北黄海盆地东部拗陷中生界烃源岩特征[J]. 中国海上油气, 2013, 25(4): 12-16. [LIU Jinping, WANG Gaiyun, DU Min, et al. Analyzing characteristics of Mesozoic hydrocarbon source rocks in the Eastern depression, North Yellow Sea basin [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2013, 25(4): 12-16.]
- [15] 刘振湖, 王飞宇, 刘金萍, 等. 北黄海盆地东部拗陷油气成藏时间研究[J]. 石油实验地质, 2014, 36(5): 550-554. [LIU Zhenhu, WANG Feiyu, LIU Jinping, et al. Time of hydrocarbon accumulation in eastern depression of North Yellow Sea basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 36(5): 550-554.]
- [16] 王后金, 王嘹亮, 冯长茂. 北黄海盆地的成盆动力学机制探讨[J]. 石油天然气学报, 2014, 36(5): 1-7. [WANG Houjin, WANG Liaoliang, FENG Changmao. On dynamic mechanism of tectonic evolution in the North Yellow Sea basin [J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2014, 36(5): 1-7.]
- [17] 杜民, 胡小强, 王改云. 北黄海盆地东部拗陷东南部层序地层特征及沉积体系[J]. 海洋地质前沿, 2014, 30(1): 25-33. [DU Min, HU Xiaoqiang, WANG Gaiyun. Sequence stratigraphic characteristics and depositional systems in the southeast of the eastern depression of the North Yellow Sea basin [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2014, 30(1): 25-33.]
- [18] 张莉, 周永章, 王嘹亮, 等. 北黄海盆地生烃条件研究[J]. 天然气工业, 2009, 29(1): 21-25. [ZHANG Li, ZHOU Yongzhang, WANG Liaoliang, et al. A study on hydrocarbon generation conditions in the North Yellow Sea basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(1): 21-25.]
- [19] 袁书坤, 王英民, 刘振湖, 等. 北黄海盆地东部拗陷不整合类型及油气成藏模式[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(6): 663-667. [YUAN Shukun, WANG Yingmin, LIU Zhenhu, et al. Unconformity types and hydrocarbon accumulation models in the eastern depression of the North Yellow Sea basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(6): 663-667.]
- [20] Gao D, Cheng R H, Shen Y J, et al. Weathered and volcanic provenance-sedimentary system and its influence on reservoir quality in the east of the eastern depression, the North Yellow Sea basin [J]. *Journal of Earth Science*, 2018, 29(2): 353-368.
- [21] 高丹, 程日辉, 沈艳杰, 等. 北黄海盆地东部拗陷侏罗纪西南物源-沉积体系与源区构造背景[J]. 地球科学, 2016, 41(7): 1171-1187. [GAO Dan, CHENG Rihui, SHEN Yanjie, et al. Southwestern provenance-sedimentary system and provenance tectonic setting of eastern sag in the North Yellow Sea basin [J]. *Earth Science*, 2016, 41(7): 1171-1187.]
- [22] Emery D, Myers K J, Young R. Ancient subaerial exposure and freshwater leaching in sandstones [J]. *Geology*, 1990, 18(12): 1178-1181.
- [23] Ramm M. Porosity-depth trends in reservoir sandstones: theoretical models related to Jurassic sandstones offshore Norway [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1992, 9(5): 553-567.
- [24] 张文才, 李贺, 李会军, 等. 南堡凹陷高柳地区深层次生孔隙成因及



- 分布特征[J]. *石油勘探与开发*, 2008, 35(3): 308-312. [ZHANG Wencai, LI He, LI Huijun, et al. Genesis and distribution of secondary porosity in the deep horizon of Gaoliu area, Nanpu Sag [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008, 35(3): 308-312.]
- [25] 陈亮, 金庆焕, 刘振湖, 等. 太阳盆地中生代断裂特征及成因机制[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2008, 28(2): 53-60. [CHEN Liang, JIN Qinghuan, LIU Zhenhu, et al. Features and genetic mechanism of faults in the Sun Basin in Mesozoic and Cenozoic times [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008, 28(2): 53-60.]
- [26] Schmidt V, McDonald D A. The role of secondary porosity in the course of sandstone diagenesis[Z]. SEPM Special Publication No. 26, 1979: 175-207.
- [27] Gibling M R, Martel A T, Nguyen M H, et al. Fluid evolution and diagenesis of a Carboniferous channel sandstone in the Prince Colliery, Nova Scotia, Canada [J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 2000, 48(2): 95-115.
- [28] Salem A M, Morad S, Mato L F, et al. Diagenesis and reservoir-quality evolution of fluvial sandstones during progressive burial and uplift: evidence from the Upper Jurassic Boipeba member, Recôncavo Basin, northeastern Brazil [J]. *AAPG Bulletin*, 2000, 84(7): 1015-1040.
- [29] Taylor K G, Gawthorpe R L, Curtis C D, et al. Carbonate cementation in a sequence-stratigraphic framework: Upper Cretaceous sandstones, book cliffs, Utah-Colorado [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2000, 70(2): 360-372.
- [30] Surdam R C, Boese S W, Crossey L J. The chemistry of secondary porosity: Part 2. Aspects of porosity modification [J]. *AAPG Memoir*, 1984, 37(2): 127-149.
- [31] 王勇, 钟建华, 陈昊, 等. 东濮凹陷古近系深层次生孔隙垂向分布特征及成因[J]. *石油勘探与开发*, 2006, 33(5): 576-580. [WANG Yong, ZHONG Jianhua, CHEN Hao, et al. Vertical distribution and genesis of the secondary pore in deep formation of Paleogene at Dongpu Sag [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2006, 33(5): 576-580.]
- [32] 王鹏, 赵澄林. 东濮凹陷杜桥白地区深部储集层次生孔隙成因探讨[J]. *石油勘探与开发*, 2001, 28(4): 44-46. [WANG Peng, ZHAO Chenglin. An approach to the generating mechanism of secondary pores in Duqiaobai area of Dongpu depression [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2001, 28(4): 44-46.]
- [33] 远光辉, 操应长, 杨田, 等. 论碎屑岩储层成岩过程中有机酸的溶蚀增孔能力[J]. *地学前缘*, 2013, 20(5): 207-219. [YUAN Guanghui, CAO Yingchang, YANG Tian, et al. Porosity enhancement potential through mineral dissolution by organic acids in the diagenetic process of clastic reservoir [J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(5): 207-219.]