

# 高邮凹陷阜宁组一段致密砂岩储层特征及其物性控制因素

周 磊

中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东 东营

收稿日期: 2021年11月22日; 录用日期: 2022年1月6日; 发布日期: 2022年1月13日

## 摘 要

针对高邮凹陷阜一段致密储层物性差异大, 物性控制因素认识不清的问题, 综合利用薄片观察、扫描电镜观察、高压压汞、恒速压汞和微米CT扫描等技术方法, 对研究区致密储层特征开展了研究。结果表明, 研究区致密储层具有高石英含量, 低岩屑、长石含量, 主要发育有压实作用、胶结作用、溶蚀作用和交代作用等成岩作用类型, 储集空间以粒间、粒内溶蚀孔隙为主, 其次为原生孔隙和晶间孔隙。通过对比研究区南部断阶带与北部斜坡内带致密储层特征, 认为沉积作用、构造作用、成岩作用和孔隙结构四个因素综合作用导致了两个地区储层物性的差异, 沉积作用宏观上控制不同相带储层的物性分布, 构造作用通过控制不同地区储层的埋藏方式进而影响成岩作用, 在不同成岩作用类型和成岩作用强度下储层形成了不同的孔隙结构类型, 并最终导致了储层物性的差异。

## 关键词

物性控制因素, 成岩作用, 孔隙结构, 高邮凹陷

# Reservoir Characteristics and Controlling Factors on Physical Properties of Tight Sandstone in 1<sup>st</sup> Member of Funing Formation in Gaoyou Sag

Lei Zhou

Exploration and Development Research Institute, Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying Shandong

Received: Nov. 22<sup>nd</sup>, 2021; accepted: Jan. 6<sup>th</sup>, 2022; published: Jan. 13<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

Reservoir characteristics are researched on the problem of great difference in physical properties and confusion of physical properties control factors that in the first member of Funing formation in Gaoyou Sag. Thin section observation, scanning electron microscope observation, high-pressure mercury injection, rate-controlled mercury injection and micron CT scanning were used in this study. Research indicates that the reservoirs mainly consist of high quartz content, low feldspar and lithic content, the main diagenesis of which includes compaction, cementation, dissolution, and replacement. The reservoir space is dominated by intergranular and intragranular dissolution pores, followed by primary pores and intercrystalline pores. Sedimentation, tectonics, diagenesis and pore structure lead to the differences of physical properties between the Southern step-fault zone and the Northern Slope zone. Sedimentation controls the distribution of physical properties of reservoirs in different facies zones, tectonics influences diagenesis by controlling the burial modes of reservoirs in different regions. Under the different diagenetic types and diagenetic intensity, different types of pore structure are formed in reservoirs, which finally lead to the differences of reservoir physical properties.

## Keywords

Physical Properties Control Factors, Diagenesis, Pore Structure, Gaoyou Sag

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

为尽快寻找新的储量接替阵地, 江苏油田加强了资源探明程度相对较低的新区带、新层系、新类型“三新”领域的研究和勘探力度。近期, 在高邮凹陷斜坡内侧和断阶带的近源层系中发现了致密油藏, 其中花斜 33、富深斜 1 等井在阜一段获得重大突破, 展示了高邮凹陷中深层致密油勘探的广阔前景[1]。前人从沉积相类型、成岩作用、油气充注等方面对高邮凹陷阜一段致密储层孔隙演化及成因开展了大量研究[2]-[7], 认为有利沉积相、建设性成岩作用及早期油气充注等是优质致密储层形成的主要因素, 但对南部断阶带与北部斜坡内带因致密储层非均质性导致的储层物性差异问题未能充分研究[2], 导致一批井出现了不同程度的失利或难以稳产, 因此, 有必要对导致储层物性差异性的因素开展研究。笔者运用扫描电镜、高压压汞、恒速压汞、CT 扫描等技术手段对致密储层孔隙结构特征进行了精细刻画, 从孔隙结构这一决定储层物性的本质出发, 结合储层岩石学、成岩作用、沉积相特征差异, 对储层物性差异性的控制因素开展了研究, 为促进稳产、提高勘探成功率提供科学决策。

## 2. 区域地质概况

高邮凹陷位于苏北盆地南部, 东台坳陷中部, 南为通扬隆起, 北接柘垛低凸起与建湖隆起相连, 东部紧靠吴堡低凸起与溱潼凹陷相连, 西接菱塘桥低凸起与金湖凹陷相隔, 东西长约 100 km, 南北宽约 25~30 km, 面积达 2670 km<sup>2</sup>, 呈北东向长条形分布。凹陷受控于南部及东部的边界大断层, 总体结构呈南断北超的箕状结构, 构造上可划分为北部斜坡带, 中央深凹带和南部断阶带[3]。

高邮凹陷阜一段沉积时期主要发育三角洲沉积, 砂体在垂向上连片发育、垂向上相互叠置, 形成有

利的储层体[4] [5]；阜一段上覆层位阜二段为凹陷深层的主力烃源岩层，TOC 介于 1.0%~2.5%之间， $S_1$  值平均 0.5 mg/g，形成高邮凹陷阜宁组“上生下储”的油气成藏特点[1]。阜一段致密油藏主要分布在北部斜坡内侧以及南部断阶带的低台阶地区，究其原因是因为这两个地区的储层紧邻生油洼陷，油气成藏具有得天独厚的优势。

### 3. 储层基本特征

#### 3.1. 储层岩石学特征

阜一段北部斜坡内带与南部断阶带致密储层岩石学特征基本相似，岩石粒度整体偏细，以粉砂岩、细砂岩为主。岩石类型基本相同，以长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩为主，石英含量介于 50%~80%，平均含量为 62.3%；长石含量介于 10%~25%，平均含量为 18.5%；岩屑含量介于 10%~30%，平均含量为 21.3%；杂基含量介于 2%~7%，平均含量为 4.1%；胶结物以碳酸盐胶结物占主导，(铁)方解石胶结物含量介于 6.5%~15.2%，平均含量为 10.8%；白云石胶结物含量介于 4.1%~6.2%，平均含量为 4.7%；硅质胶结物平均含量不到 2%；粘土矿物含量介于 2.1%~14%，平均含量 6.5% (图 1)。岩石颗粒分选中等，磨圆中等，多呈次圆状-次棱角状，成分成熟度和结构成熟度中等-好。

北部斜坡内带致密储层在灰质胶结物和粘土矿物含量上高于南部断阶带。

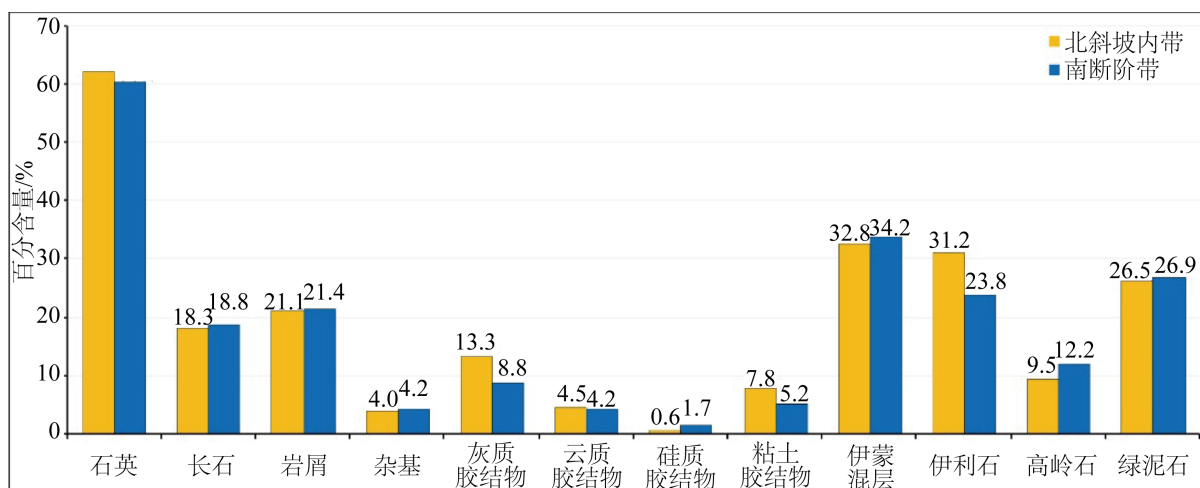


Figure 1. Histograms of rock composition content in the 1<sup>st</sup> member of Funing Formation, Gaoyou Sag

图 1. 高邮凹陷阜一段岩石成分含量分布直方图

#### 3.2. 储层成岩作用特征

高邮凹陷阜一段储层的成岩作用主要包括压实作用、胶结作用、溶蚀作用、交代作用等类型。其中破坏性成岩作用主要有压实作用和胶结作用。这些破坏性的成岩作用不仅使砂岩储集层的原始孔隙空间损失，而且进一步破坏次生溶孔，粒间的各种自生矿物的充填和胶结作用能堵塞孔隙而使渗透性变差；建设性成岩作用为溶蚀作用，它使砂岩的储集空间有所增加[6] [7] [8] [9]。

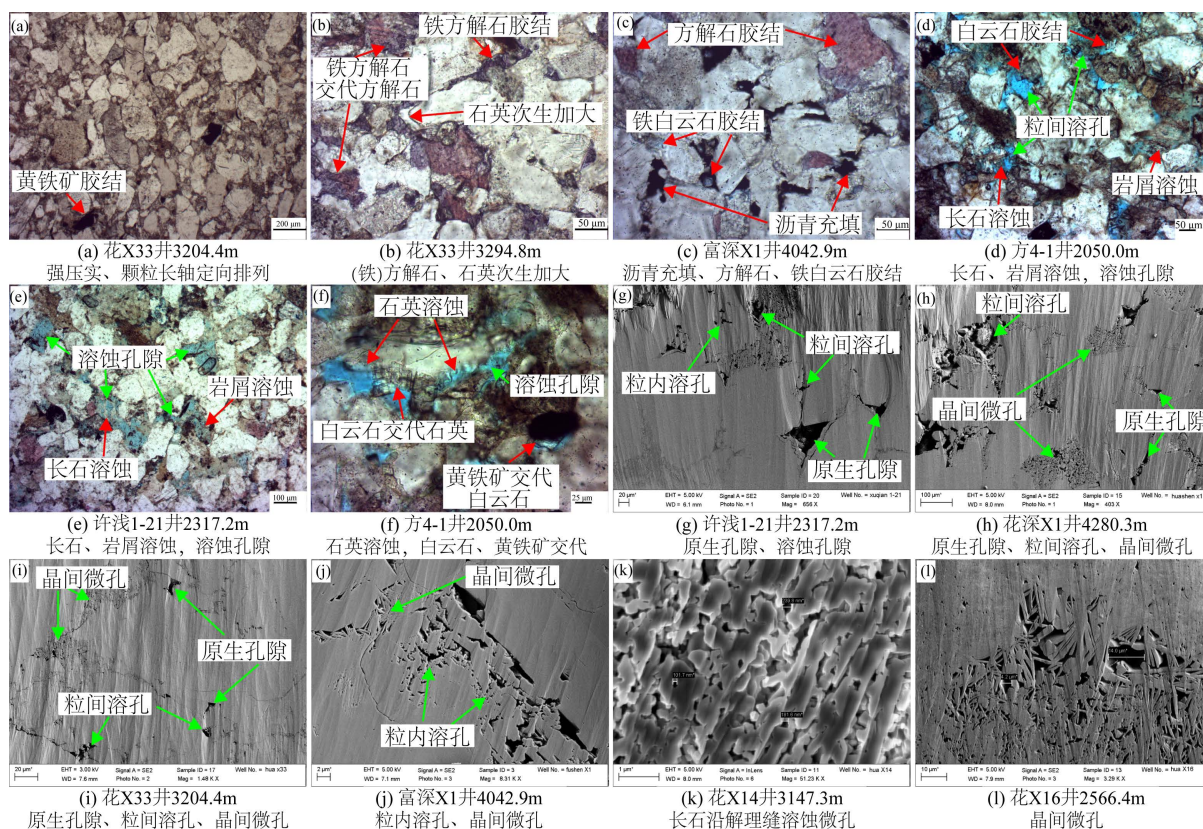
##### 1) 压实作用

高邮凹陷南断阶带与北斜坡内带阜一段埋深较大，加之储层粒度细，压实作用强烈，表现为颗粒紧密排列，线接触较多，可见颗粒长轴的定向排列(图 2(a))。压实作用贯穿于成岩作用的始终，且早期的压实作用对储层孔隙影响最大，是本区储层致密化的主要成岩作用之一。

## 2) 胶结作用

高邮凹陷阜一段胶结作用主要有碳酸盐胶结、硅质胶结、粘土矿物胶结和少量黄铁矿胶结等类型。碳酸盐胶结物含量平均在 15% 以上, 包括早期方解石、白云石以及晚期的铁方解石、铁白云石等(图 2(b)~(d)), 胶结方式多为孔隙式胶结, 碳酸盐胶结是本区储层致密化的另一主要成岩作用; 硅质胶结多以次生加大边形式出现(图 2(b)); 粘土矿物胶结以伊蒙混层和伊利石占主导, 其次为绿泥石, 粘土矿物对储层的影响就是堵塞孔隙和喉道, 导致出现大量粘土矿物晶间孔。

高邮凹陷阜一段北斜坡带致密储层胶结作用强于南断阶带, 其碳酸盐胶结物含量、粘土矿物含量明显多于南断阶带储层。



**Figure 2.** Characteristics of diagenesis and reservoir space of tight reservoir in the 1<sup>st</sup> member of Funing Formation, Gaoyou Sag

**图 2.** 高邮凹陷阜一段致密储层成岩作用特征及储集空间特征

## 3) 溶蚀作用

高邮凹陷阜一段溶蚀作用较为发育, 发育有长石、岩屑和石英的粒间溶蚀、粒内溶蚀, 甚至可见长石铸模孔隙, 溶蚀后在镜下可见颗粒的不规则边缘(图 2(d)~(f)), 在氩离子抛光扫描电镜下可见粒内及粒间的溶蚀微孔(图 2(g)~(k))。碳酸盐胶结物的溶蚀多为方解石和铁方解石的溶蚀, 溶蚀规模小于长石和岩屑的溶蚀。整体而言, 南部断阶带储层溶蚀作用强于北部斜坡带, 表现在南部断阶带储层溶孔的体积相对较大, 而北部斜坡带储层溶孔体积明显较小(图 2(h)~(j))。

高邮凹陷阜一段储层整体致密背景下, 局部储层的物性较好与溶蚀作用关系密切。

## 4) 交代作用

高邮凹陷阜一段溶蚀作用交代作用也较为常见, 主要是碳酸盐胶结物之间的交代(图 2(c))、碳酸盐胶结物对颗粒的交代, 以及黄铁矿与颗粒、碳酸盐胶结物之间的交代(图 2(f))。

### 3.3. 储层物性特征

阜一段储层物性整体较差, 储层平均孔隙度为 7.86%, 平均渗透率  $0.25 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 其中孔隙度小于 10% 的储层占 63.7%, 孔隙度小于 12% 的占 85.7%, 渗透率小于  $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的储层占 79.5% (图 3), 因此高邮凹陷阜一段储层属致密储层。从图 2 中不难发现南部断阶带储层物性明显优于北部斜坡带, 前者平均孔隙度达 10.32%, 平均渗透率为  $0.43 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 而后者平均孔隙度仅 6.98%, 平均渗透率为  $0.25 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

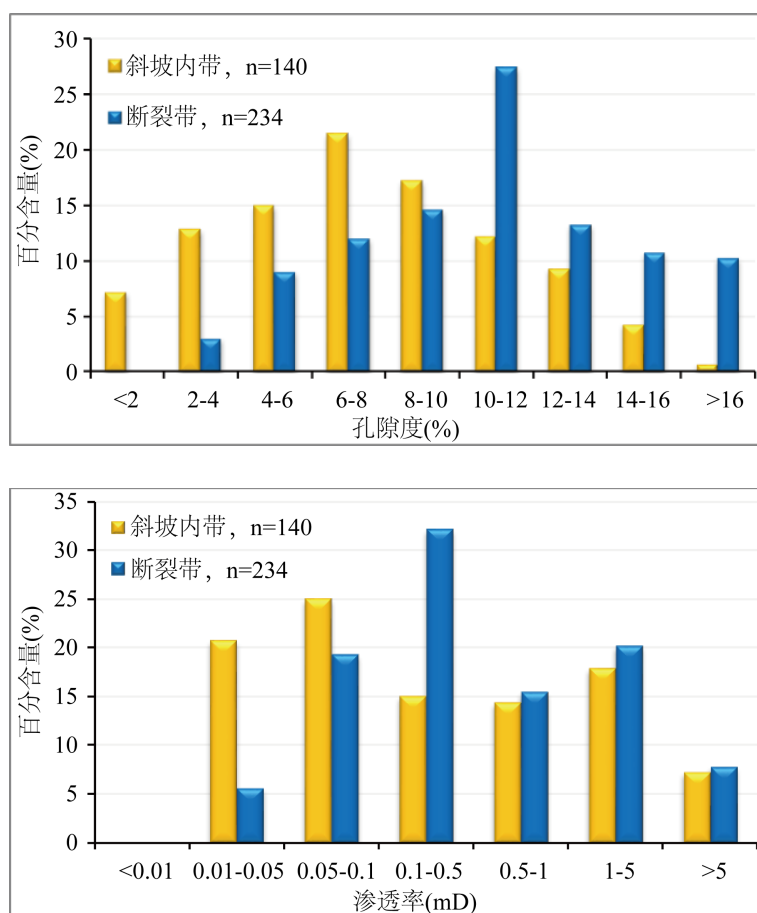


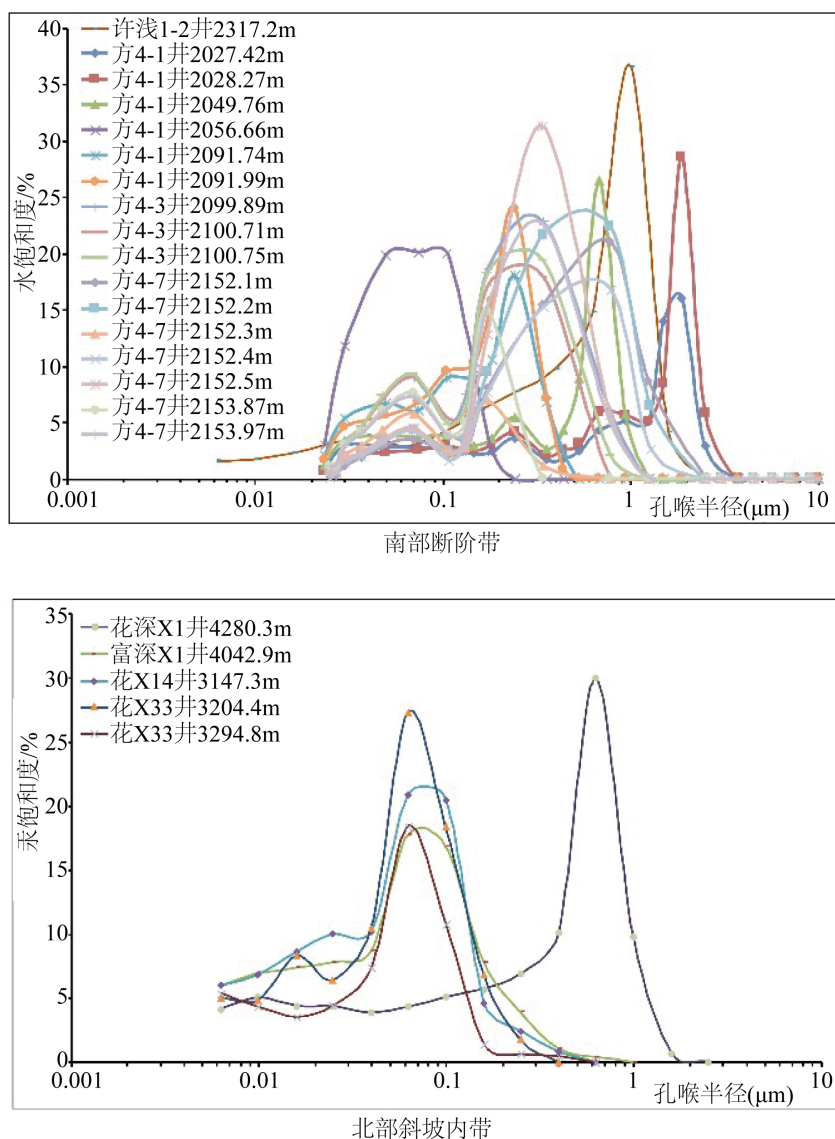
Figure 3. Histograms of physical property of tight reservoir in the 1<sup>st</sup> member of Funing Formation, Gaoyou Sag

图 3. 高邮凹陷阜一段储层物性分布直方图

### 3.4. 储层孔隙结构特征

高邮凹陷阜一段致密储层孔隙类型多样, 其中长石、岩屑的溶蚀孔隙较为发育, 占总孔隙的 57.6% (图 2(d)~(f)、图 2(k)), 石英和碳酸盐胶结物溶蚀孔隙约占 5.5%, 原生孔隙相对约占 16.4% (图 2(g)~(i)), 另外还发育大量粘土矿物晶间孔, 约占 20.5% (图 2(h)、图 2(i)、图 2(l)); 喉道类型有缩颈型、片状、弯片状和管束状等类型, 由于颗粒间接触关系以线接触为主, 少量呈点-线接触, 因此喉道类型以片状或弯片状占主导, 其次为缩颈型喉道和管束型喉道。

高压压汞分析显示高邮凹陷阜一段致密储层发育大量纳米级孔喉, 超过 74.5% 储层平均孔喉半径小于  $0.5 \mu\text{m}$ ; 孔喉半径分布呈现一个主峰、多个次峰的形态, 物性越好的储层, 主峰分布的孔喉半径越大。不难发现, 南部断裂带致密储层孔喉半径分布明显大于北部斜坡带储层, 表明前者的孔隙结构明显优于后者(图 4)。



**Figure 4.** Distribution of pore-throat radius of tight reservoir in the 1<sup>st</sup> member of Funing Formation, Gaoyou Sag

**图 4.** 高邮凹陷阜一段致密储层孔喉半径分布图

恒速压汞分析表明, 不同物性的致密储层, 孔道半径分布范围和峰值比较接近, 主要分布于  $100\sim 150 \mu\text{m}$  左右, 而喉道半径分布区间较大, 介于  $0.2\sim 2.5 \mu\text{m}$  之间(图 5); 储层渗透率越大, 喉道半径分布范围越宽, 大喉道含量越高, 喉道连通的孔隙越多, 这表明喉道是控制储层物性的主要因素。

对比南部断阶带与北部斜坡内带致密储层的高压压汞孔喉分布和恒速压汞喉道分布, 前者的孔喉分布和喉道半径分布均明显大于后者, 同样表明南部断阶带致密储层孔隙结构优于后者。

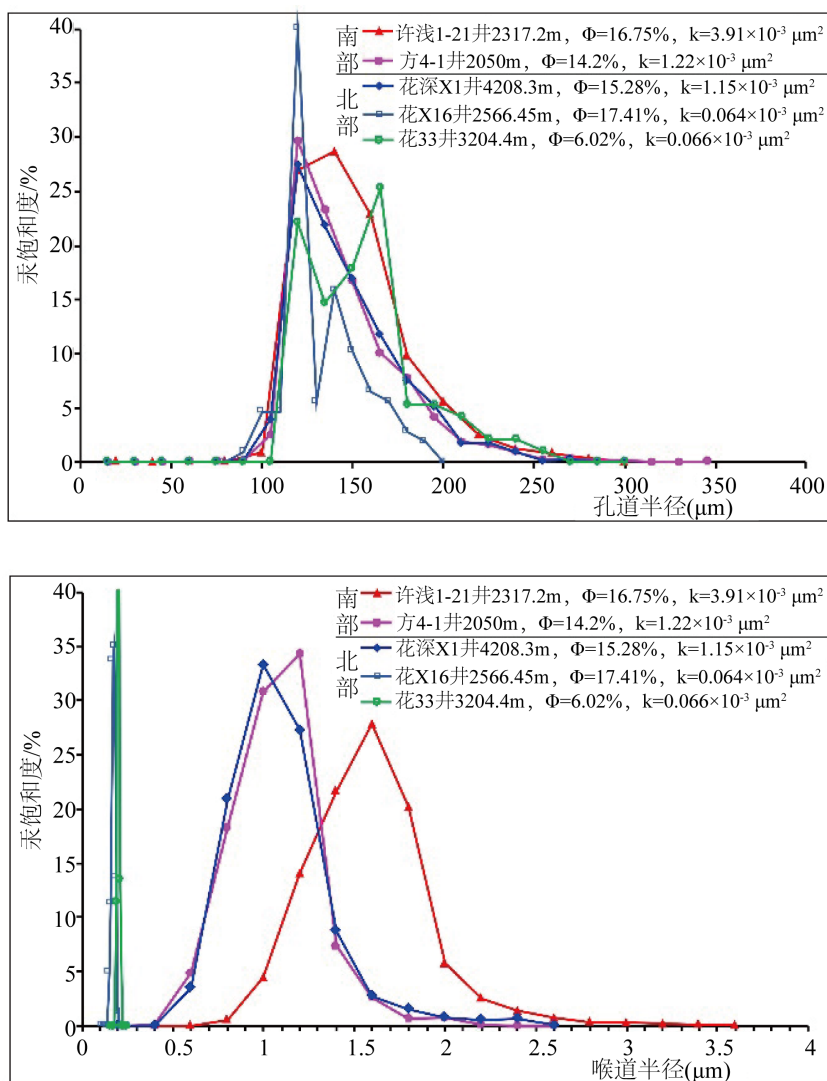


Figure 5. Distribution of pore-throat radius of rate-controlled mercury penetration technique in the 1<sup>st</sup> member of Funing Formation, Gaoyou Sag

图 5. 高邮凹陷阜一段储层恒速压汞孔喉半径分布图

#### 4. 致密储层物性的控制因素

致密储层的形成与沉积作用、成岩作用、构造作用等地质因素密切相关。通过分析高邮凹陷阜一段致密储层的岩石学、成岩作用、储集空间等特征分析，认为影响研究区储层物性的因素主要有以下四个方面：

##### 4.1. 沉积作用对储层物性的控制

沉积相控制了储层岩性、岩石成分、储层厚度等特征，是储层发育的物质基础，直接影响储层的质量。高邮凹陷阜一段主要为三角洲沉积，储集砂体以三角洲粉砂岩和细砂岩为主，沉积微相主要有水下分流河道、河口坝、席状砂、水下分流间湾等类型，对各微相砂体物性统计分析发现，不同沉积微相砂体物性具有较大的差异(图 6)，有利沉积相带具有较好的物性，尤其是水下分流河道微相，河口坝微相次之，席状砂与间湾的物性最差，从而表现出了明显的相控储层的特征。这是因为水下分流河道、河口坝

比席状砂和水下分流间湾砂体发育更粗的粒度、更好的分选以及更高的成分成熟度，具有更高的原始物性和抗压实减孔能力[8]。因此，对于阜一段而言，优势沉积相带更有利于高物性致密储层的发育。

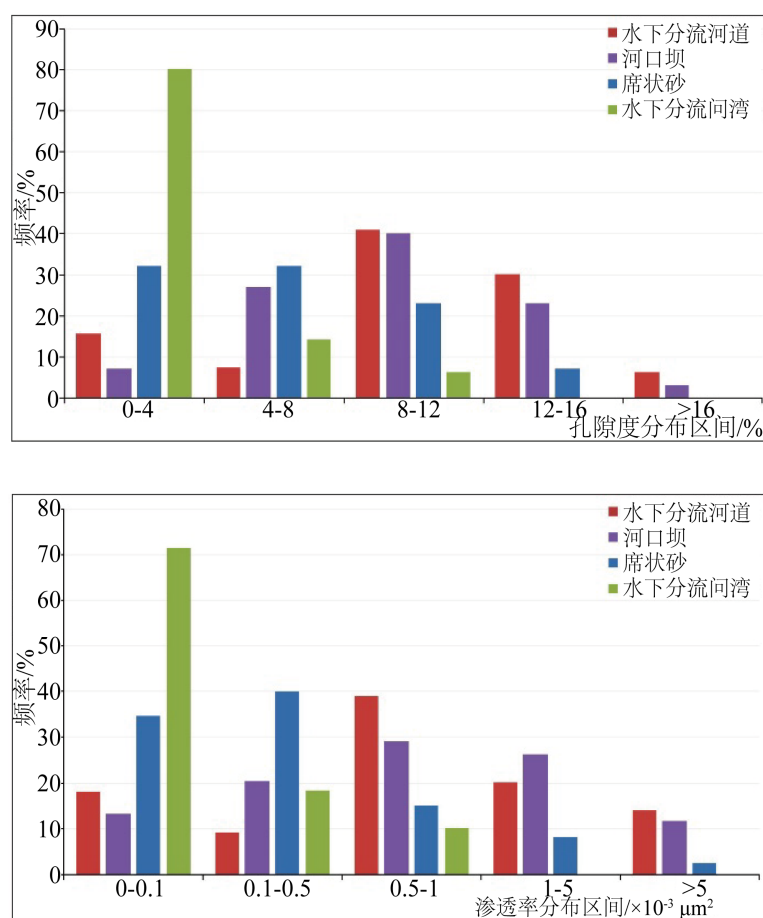


Figure 6. Physical property histograms of different sedimentary facies in the 1<sup>st</sup> member of Funing Formation, Gaoyou Sag

图 6. 高邮凹陷阜一段不同沉积微相储层物性分布直方图

#### 4.2. 构造作用对储层物性的控制

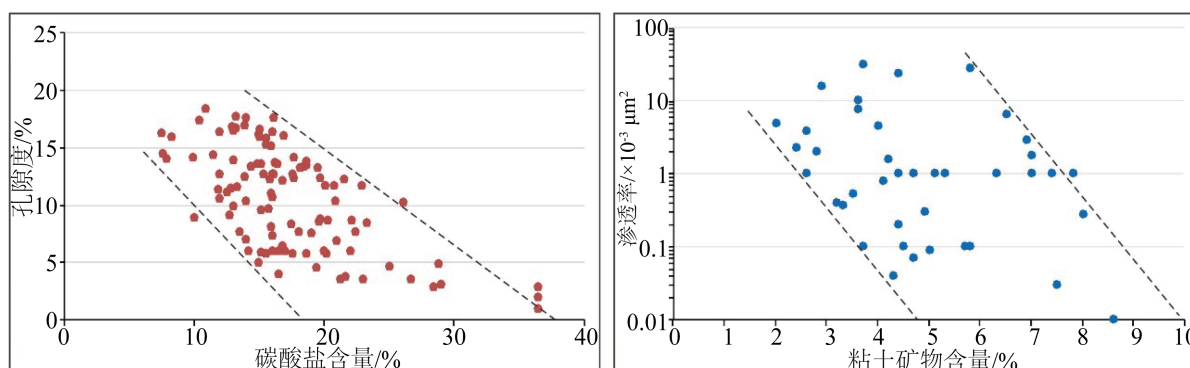
高邮凹陷在阜宁组至戴南组沉积时期，处于相对持续稳定的持续埋藏阶段，三垛组沉积时期盆地达到最大埋深，之后由于构造作用抬升遭受强烈剥蚀，随后在盐城组沉积时期盆地的沉降中心由南部转移到东部，东部北斜坡新近系以来的地层沉积厚度最厚超过 1500 m，而南断阶带不到 500 m，导致南部断阶带储层现今的埋藏深度小于其最大埋深，储层在油气充注前已经致密[2]，溶蚀作用发生后油气充注成藏，之后再次埋藏的深度小于之前构造抬升的幅度，其物性受成岩作用影响不大，镜下仍可观察到大量溶蚀孔隙存在(图 2(d)~(f))；北部斜坡带致密储层现今埋深即最大埋深，储层在油气充注后埋藏至今，属成藏后致密，储层致密程度较高，强烈的压实和胶结作用大大破坏了储层的储集空间，虽然在孔隙中仍可见沥青残余(图 2(c))，但孔隙细小、孔喉连通性差，从而也导致储层物性较差。

#### 4.3. 成岩作用对储层物性的控制

成岩作用对储层的储集空间类型、孔隙结构、填隙物成分都起着决定性影响，是影响储层物性的重



要途径[10] [11] [12]。高邮凹陷阜一段储层成岩作用目前主要处于中成岩 A - 中成岩 B 期[2] [6] [7]，高邮凹陷阜一段致密储层经历了压实作用 - 石英次生加大 - 早期碳酸盐胶结 - 长石/岩屑/碳酸盐溶蚀 - 油气充注 - 晚期碳酸盐胶结 - 黄铁矿胶结的成岩序列[6] [13] [14]。南部断阶带致密储层胶结作用相对较弱，溶蚀作用强烈，储层溶蚀孔隙大量发育，大大改善了储层的储集性能，为油气充注提供了储集空间；而北部斜坡带致密储层胶结作用强烈，溶蚀作用相对较弱，对储层物性的改善能力较为有限，而且由于碳酸盐胶结物和粘土矿物相对发育，占据孔隙和喉道空间，降低了储层的储集性能(图 7)。



**Figure 7.** The relationship between carbonate cement content & clay mineral content and physical property in the 1<sup>st</sup> member of Funing Formation, Gaoyou Sag

**图 7.** 高邮凹陷阜一段碳酸盐胶结物含量及粘土矿物含量与物性关系图

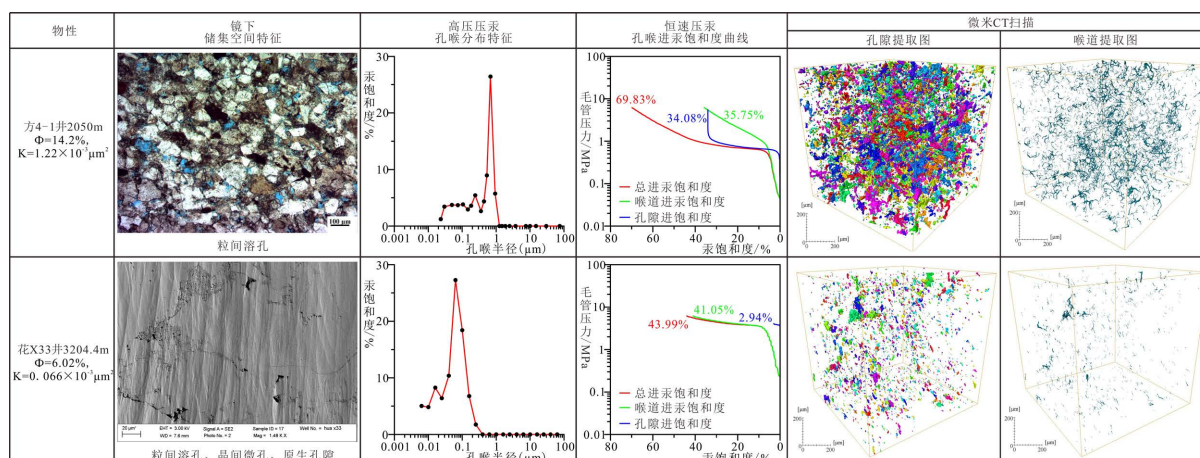
#### 4.4. 孔隙结构对储层物性的控制

大量研究表明，孔隙结构是导致储层物性差异的直接原因[15] [16] [17]。高邮凹陷阜一段南部断阶带储层以粒间溶孔、原生孔隙为主，孔隙孔径较大，以缩颈型、片状或弯片状喉道相互连通，连通性较好；而北部斜坡带储层以粒间溶孔、颗粒溶蚀微孔、晶间微孔和原生孔隙为主，储层中含有大量微孔隙，这些微孔隙大多以管束状喉道与孔隙相连通，连通性较差，不利于流体的渗流。

例如方 4-1 井 2050 m 孔隙类型为粒间溶蚀孔隙，孔喉分布区间较大，恒速压汞显示具有较高的孔隙进汞饱和度，占总进汞饱和度的 50%；微米 CT 扫描也显示储层孔隙和喉道发育，孔隙和喉道具有良好的匹配关系(图 8)；而花 X33 井 3204.4 m 孔隙类型为粒间溶孔、晶间微孔和原生孔隙，孔喉分布区间明显较小，恒速压汞显示其孔隙进汞饱和度极低，喉道进汞饱和度占总进汞饱和度的 93% 以上，表明储层的储集能力主要由喉道贡献，较差的喉道连通性导致大量孔隙成为孤立孔隙，难以发挥储集流体的作用，从而导致了两个储层物性上的巨大差异。

高压压汞和恒速压汞定量分析表明北部斜坡带致密储层无论孔喉大小、孔喉分布区间整体上均不及南部断阶带致密储层，这也是南部断阶带致密储层物性好于北部斜坡内带的直接原因。

综上所述，高邮凹陷阜一段致密储层物性受沉积作用、构造作用、成岩作用和孔隙结构四个因素的综合影响。整体而言，研究区储层具有明显的相控特征，沉积作用通过控制砂体的物质组成和相带分异决定储层的宏观物性分布，这是致密储层物性差异的基础；构造作用通过控制储层的埋藏方式影响储层的成岩作用，南部断阶带致密储层与北部斜坡内带致密储层由于不同的埋藏方式，进而导致发生了不同强度的成岩作用类型，前者以溶蚀强、胶结弱为特征，有利于改善储层物性，后者以胶结强、溶蚀弱为特征，储层物性改善有限；在不同成岩作用下储层形成了不同的孔隙结构类型，最终导致了南部断阶带致密储层与北部斜坡内带致密储层物性的差异。



**Figure 8.** Characteristics of reservoir space and pore structure in the 1<sup>st</sup> member of Funing Formation, Gaoyou Sag  
**图 8.** 高邮凹陷阜一段致密储层储集空间及孔隙结构特征

## 5. 结论

1) 高邮凹陷阜一段北部斜坡内带与南部断阶带致密储层在岩石学类型、成岩作用类型、储集空间类型等特征基本相似，但在胶结物类型及含量、成岩作用强度、储集空间类型及物性等特征上具有较明显的差异，北部斜坡内带致密储层灰质胶结物和粘土矿物含量高于南部断阶带，且孔隙结构及储集空间类型劣于南部断阶带，储层物性则以南部断阶带优于北部斜坡内带。

2) 沉积作用、构造作用、成岩作用相互耦合控制了高邮凹陷阜一段致密储层孔隙结构的发育，进而形成了南部断阶带与北部斜坡带储层物性的差异。沉积作用控制了不同相带储层矿物成分及结构的差异，形成了成岩作用物质基础的差异；构造作用通过控制北部斜坡带与南部断阶带储层的埋藏方式进而控制成岩作用演化的差异，在不同成岩作用类型和成岩作用强度差异下形成了两个地区储层孔隙结构的差异，并最终导致了储层物性的差异。

## 参考文献

- [1] 邱旭明, 钱诗友, 于雯泉, 刘启东. 苏北盆地“十二五”油气勘探主要成果、新认识及技术进展[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(3): 62-73.
- [2] 于雯泉, 王路, 陆梅娟. 高邮凹陷阜一段致密砂岩孔隙演化差异分析[J]. 复杂油气藏, 2017, 10(1): 9-16.
- [3] 秦伟军, 李娜, 付兆辉. 高邮凹陷深层系有效储层形成的控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(5): 788-792.
- [4] 纪友亮, 卢欢, 刘玉瑞. 苏北盆地高邮凹陷古近系阜宁组一段浅水三角洲和滩坝沉积模式[J]. 古地理学报, 2013, 15(5): 729-740.
- [5] 吴思仪, 司马立强, 袁龙, 温新房. 高邮凹陷阜一段低渗透储层特征及成因分析[J]. 岩性油气藏, 2014, 26(2): 47-53.
- [6] 张金亮, 刘宝珺, 毛凤鸣, 常象春. 苏北盆地高邮凹陷北斜坡阜宁组成岩作用及储层特征[J]. 石油学报, 2003, 24(2): 43-49.
- [7] 纪友亮, 王艳艳, 刘玉瑞, 卢欢. 高邮凹陷阜一段差异成岩作用及成因[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(3): 474-479.
- [8] 操应长, 蒯克来, 王健, 远光辉, 杨田. 砂岩机械压实与物性演化成岩模拟实验初探[J]. 现代地质, 2011, 25(6): 1152-1158.
- [9] Surdam, R.C., Crossey, L.J., Sven Hagen, E. and Heasler, H.P. (1989) Organic-Inorganic and Sandstone Diagenesis. *AAPG Bulletin*, 73, 1-23. <https://doi.org/10.1306/703C9AD7-1707-11D7-8645000102C1865D>
- [10] Higgs, K.E., Zwingmann, H., Reyes, A.G. and Funnell, R.H. (2007) Diagenesis, Porosity Evolution, and Petroleum Em-

placement in Tight Gas Reservoirs, Taranaki Basin, New Zealand. *Journal of Sedimentary Research*, **77**, 1003-1025. <https://doi.org/10.2110/jsr.2007.095>

- [11] 李杪, 罗静兰, 刘新社, 赵会涛, 王怀厂, 侯云东. 孔隙结构对低渗-特低渗砂岩储层渗流特征的影响段储层为例——以鄂尔多斯盆地东部上古生界盒 8 段储层为例[J]. 地质科学, 2013, 48(4): 1148-1163.
- [12] 窦伟坦, 田景春, 王峰, 夏青松. 鄂尔多斯盆地长 6 油层组储集砂岩成岩作用及其对储层性质的影响[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2009, 36(2): 153-158.
- [13] 戴祉平, 陈勇, 于雯泉. 高邮凹陷阜宁组一段储层成岩环境演化的流体包裹体证据[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2013, 32(5): 53-60.
- [14] 李儒峰, 陈莉琼, 李亚军, 宋宁. 苏北盆地高邮凹陷热史恢复与成藏期判识[J]. 地学前缘, 2010, 17(4): 151-159.
- [15] 高辉, 敬晓锋, 张兰. 不同孔喉匹配关系下的特低渗透砂岩微观孔喉特征差异[J]. 石油实验地质, 2013, 35(4): 401-406.
- [16] Sakhaee-Pour, A. and Bryant, S.L. (2014) Effect of Pore Structure on the Producibility of Tight-Gas Sandstones. *AAPG Bulletin*, **98**, 663-694. <https://doi.org/10.1306/08011312078>
- [17] 蒲秀刚, 黄志龙, 周建生, 肖敦清, 柳飒. 孔隙结构对碎屑储集岩物性控制作用的定量描述[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2006, 21(2): 15-17+25.