

渤南洼陷沙四上亚段储层异常高孔带 及优质储层成因机制

邱隆伟¹,徐宁宁¹,刘魁元²,杨生超¹,解超¹,单宝杰²,武玉玺³

(1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东 青岛 266555;

2. 中国石化胜利油田分公司河口采油厂,山东 东营 257200;

3. 中国石化胜利油田分公司东辛采油厂地质所,山东 东营 257094)

摘要:渤南洼陷沙四上亚段碎屑岩储层约3 000~4 000m的深度范围存在明显的异常高孔带。结合岩心实测物性数据,利用连续深度区间的孔隙度分布图和建立的孔隙度—深度拟合曲线确定异常高孔隙带识别标准和分布范围。综合铸体薄片数据、扫描电镜分析、地层压力数据等,从成岩溶蚀、异常高压和早期油气充注等方面阐释异常高孔带成因,并结合沉积微相、岩相和断裂发育等总结相对优质储层成因机制。研究认为储层异常高孔带的发育得益于异常高压对孔隙的保护、中成岩A期有机质低熟阶段的有机酸溶蚀增孔作用和早期烃类充注的保孔作用;异常高孔带的发育、原始沉积因素如优势沉积微相(扇三角洲前缘水下分流河道和分流河口砂坝等)和刚性颗粒(石英、长石和变质岩岩屑等)含量相对高值的中粗粒砂岩以及断裂的发育组成相对优质储层形成的主要条件。

关键词:渤南洼陷;沙四上亚段;异常高孔带;优质储层

中图分类号:TE122.2⁺3

文献标志码:A

文章编号:1672-1926(2015)01-0001-12

引用格式:Qiu Longwei,Xu Ningning,Liu Kuiyuan,*et al.* Anomalous high porosity zone and formation mechanism of high quality reservoir of Es₄ in Bonan Sag[J]. Natural Gas Geoscience,2015,26(1):1-12. [邱隆伟,徐宁宁,刘魁元,等. 渤南洼陷沙四上亚段储层异常高孔带及优质储层成因机制[J]. 天然气地球科学,2015,26(1):1-12.]

0 引言

储层孔隙度和渗透率一般会随深度增加而减小,但在局部深埋区仍会出现异常高孔渗值。异常高孔渗带是指数据统计显示其孔渗高于典型的砂岩(考虑其岩石组构、年代和埋藏史)的深度区间^[1]。因对储层孔隙度的研究更易行和更广泛,现在多以异常高孔带(Anomalous High Porosity Zone)代表储层孔渗的相对高值发育带。

碎屑岩储层异常高孔带的研究主要集中于深部储层,成果包括对其物性特征、成因机制、孔隙度演化 and 有利储层的影响等方面^[2-10]。更多的工作集中于对异常高孔带成因的分析,主要研究成果包括增

孔作用(如大气水淋滤、有机酸溶蚀、二氧化碳酸性水溶蚀等)和保孔作用(如早期烃类充注、异常高压保护、绿泥石包壳等)。对储层异常高孔带的研究首先要对其进行识别,传统且常用的方法是通过描绘孔隙度—深度剖面的外围包络线标定相对“鼓包”发育部位且一般多定义为次生孔隙带,该方法相对缺少量化标准和说服力。如何完善相对定量且易操作的识别方法是需要深入研究的重点。

近几年对渤南洼陷沙四上亚段的油气勘探取得成效,尤其沿渤南断阶带一线的油气产能较高,在义176井、义171井等5口井均获得工业油流,并且已完成的各种储层物性测试中显示储层平均孔隙度为12.8%,平均渗透率为 $4.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,属低孔低渗

收稿日期:2014-06-02;修回日期:2014-07-19.

基金项目:国家科技重大专项(编号:2011ZX05009-002)资助.

作者简介:邱隆伟(1967-),男,江西南康人,教授,主要从事沉积学、层序地层学等研究. E-mail: qiuwlsd@163.com.

通讯作者:徐宁宁(1988-),男,山东邹城人,博士研究生,主要从事储层地质学研究. E-mail: december_13000@126.com.

储层。说明深埋低孔低渗背景下相对优质储层有相当程度的发育。研究发现埋深 3 000~4 000m 的范围表现出孔隙度和渗透率的异常高值,且和产能有极好的一致性。因此对于储层异常高孔带的判别、特征描述、成因机制以及对储层质量尤其是优质储层形成的影响是需要解决的主要问题。本文立足于上述问题,针对渤南洼陷沙四上亚段储层异常高孔带和相对优质储层的形成条件展开研究。

1 区域地质概况

渤南洼陷位于渤海湾盆地沾化凹陷北部,北靠埕南凸起,西接四扣洼陷,东邻孤西断层,向南与罗家鼻状构造相接。渤南洼陷整体呈“东西双断,北断南超”的构造格局,由北向南可进一步分为埕南断裂带、渤深 4 断阶带和缓坡带[图 1(a)]。

渤南洼陷沙四上亚段沉积期湖水持续上涨,洼

陷边部发育扇三角洲—近岸水下扇砂质碎屑沉积体系,物源主要来自于北部埕东凸起和东部孤西断层;湖盆中央发育厚层膏岩—泥膏岩的半深湖—深湖沉积^[11],垂向上呈砂质碎屑沉积到边部灰岩—泥灰岩沉积和中央泥膏岩—膏岩沉积的变化趋势。

渤南洼陷沙四上亚段可以划分为 4 个砂组,其中Ⅲ砂组和Ⅳ砂组主要发育扇体的砂质沉积[图 1(b)]。储层整体以细砂岩、粉细砂岩和粉砂岩为主,中粗砂岩次之,属扇三角洲前缘细粒沉积。岩石类型以长石质岩屑砂岩为主,含少量岩屑质长石砂岩。其中组分颗粒石英、长石和岩屑的平均含量分别为 36.5%、34.1%和 28.6%^[10]。岩屑组分以岩浆岩岩屑和变质岩岩屑为主,两者占岩屑总含量的 94.4%。颗粒间压实紧密,呈颗粒支撑,接触方式以线接触为主。颗粒大都呈次圆—次棱角状,分选差—中等,结构成熟度低。

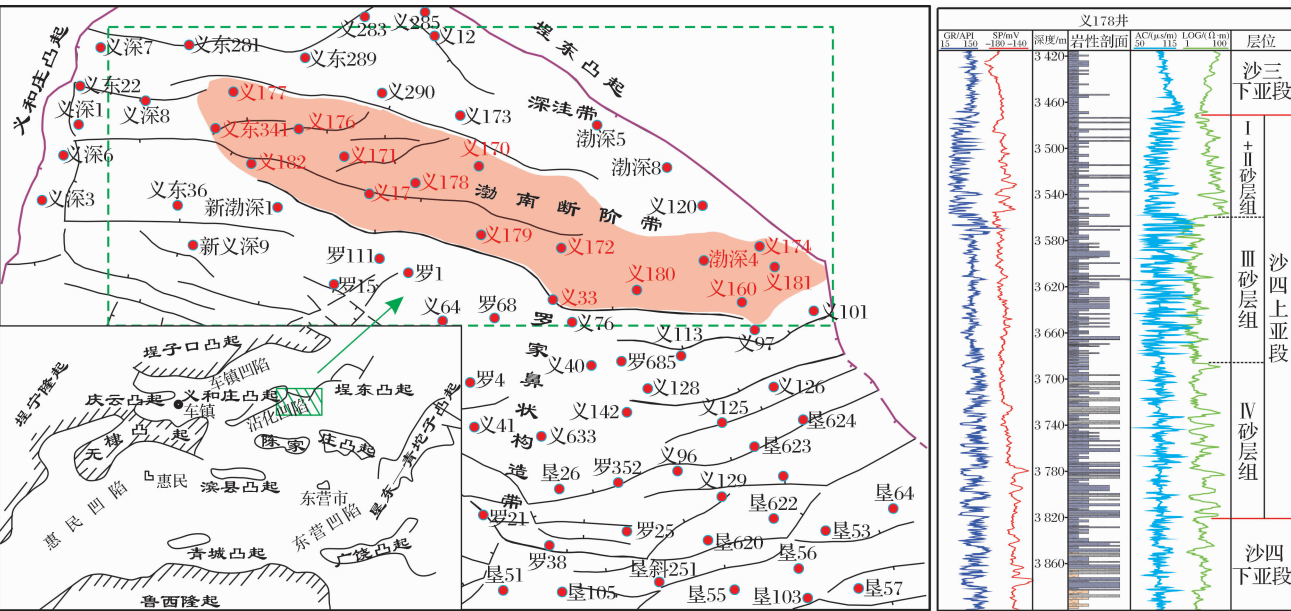


图 1 渤南洼陷构造位置(a)及沙四上亚段岩性剖面(b)

Fig. 1 Structural position and lithological profile of Es₄ of Bonan Sag

2 异常高孔渗带识别及特征

经验数据显示在相对小的深度范围内,储层孔隙度的分布呈现正态或正态对数的形态。如果孔隙度分布呈现明显的向左偏移即向右拖尾分布,则可能是样品本身或样品实际分布的原因^[1]。如剔除样品本身问题,则储层孔隙度分布偏差的原因在于原始成岩作用(压实作用、胶结作用或溶蚀作用)的影响。压实作用或强胶结作用的影响则会使孔隙度分布呈现正态对数分布的形态。溶蚀作用所造成的异

常高孔隙度值甚至可呈现出另一个正态分布的特征,从而形成双峰正态分布的特征。借助于此可以识别异常高孔带。

按照 Bloch 等^[1]的观点,正常孔隙度中的众值孔隙度(出现频率最高)和最大孔隙度意义重大。因此,在深度—孔隙度散点图中,大于最大正常孔隙度值的范围,可以认定其为异常高孔带。统计渤南洼陷沙四上亚段储层孔隙度和渗透率随深度分布情况发现,在该储层中存在明显的相对高孔渗带。初步判定在 3 500~3 700m(A 带)、3 700~3 900m(B

带)和3 900~4 000m(C带)有3个深度段孔隙度和渗透率出现相对高值带。其中A带表现出的最大孔隙度和最大渗透率较高(图2)。

按照 Bloch 等^[1]的方法,对渤南洼陷沙四上亚段(3 000~4 200m)按照每 100m 的间隔统计储层孔隙度数值的分布特征。理想情况下,每个 100m 深度区间可获得相应的正常众值孔隙度值和最大孔隙度值。进而,3 000~4 300m 深度范围则可获得

10 余个随深度变化的正常众值孔隙度值和最大孔隙度值。从而利用这些数据可拟合出两者随深度的变化关系式。由此而得到的正常众值孔隙度—深度关系可代表储层孔隙度的正常压实变化,最大孔隙度—深度关系则可代表正常孔隙度的最大分布范围。从而在明确正常孔隙度的特征和范围之后,由成岩作用或其他作用影响的孔隙度范围便可以被半定量的圈定。

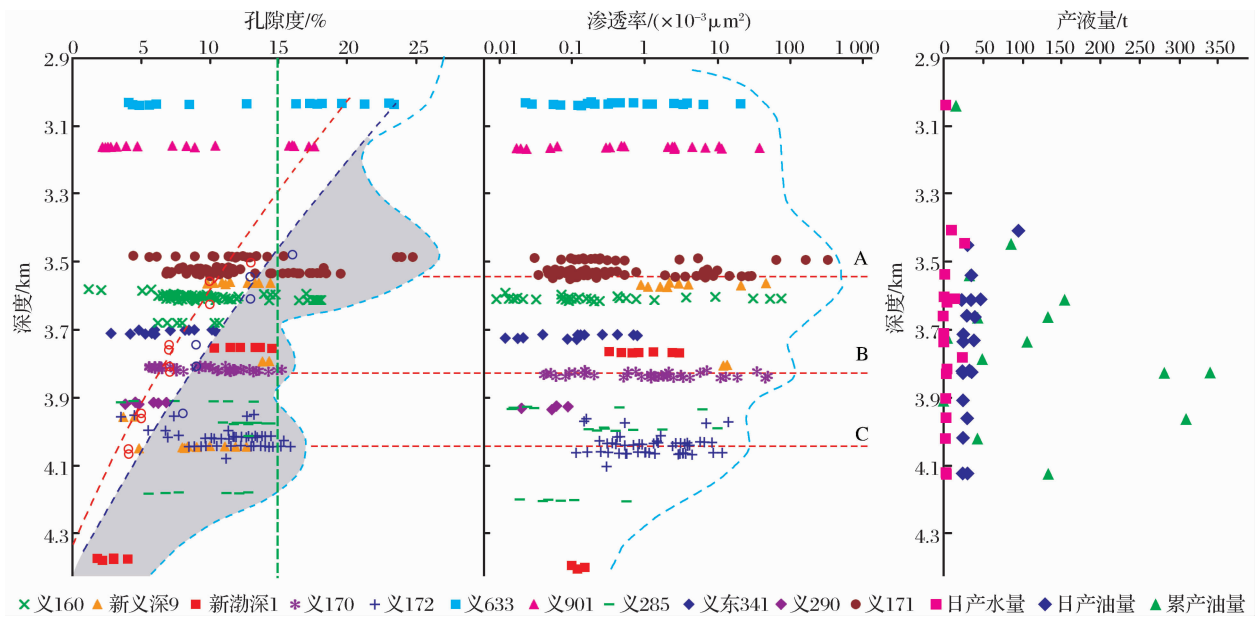


图2 渤南洼陷沙四上亚段储层孔隙度、渗透率和产液量随深度演化

Fig. 2 Evolution of porosity, permeability and liquid production capacity with depth in the Upper Es₄ Bonan Sag

渤南洼陷沙四上亚段 3 000~4 300m 深度范围按照如图 3 所示划分为 3 000~3 100m、3 100~3 200m、3 200~3 300m、3 300~3 400m、3 400~3 500m……共 8 个部分(因 3 200~3 300m 段和 4 000~4 200m 缺失孔隙度数据而跳过)。统计每个部分孔隙度分布情况可以发现在 3 400m 以深可呈现较为明显的双峰形态,而在其以浅则特征不明显。

根据 3 400m 以深的[图 3(c)—图 3(h)]6 个部分的孔隙度分布直方图,统计左侧孔隙度(正常孔隙度范围)正态分布图中的众值孔隙度值和最大孔隙度值,则可得到图 4 中拟合曲线上的散点数据。其中深度取值遵循数据密集分布范围和取中间值的原则。之后对众值孔隙度—深度和最大孔隙度—深度进行公式拟合。从而得到如图 4 所示的 2 条拟合关系曲线。2 条孔隙度—深度关系的拟合曲线(分别为图 2 中红色和蓝色虚线部分)和实测孔隙度剖面相叠合,超出最大正常孔隙度曲线的部分即可判别为异常高孔隙度部分(图 2 中灰色部分)。按照此种

方法可以相对定量地圈定异常高孔带的分布,较之于传统的通过绘制孔隙度包络线来指示孔隙发育带更具有说服力。但对于孔隙度呈现正态分布的规律更多的是来自于经验数据而缺乏强有力的理论基础,而且在实际操作过程中样品点的分布和深度区间的选取是需多加考虑的地方。

3 异常高孔渗带成因探讨

依据 Bloch 等^[1]观点认为控制和影响异常高孔带发育的因素主要有:超压、溶蚀作用、油气充注和颗粒黏土包壳。初步研究发现前三者对研究区渤南洼陷沙四上亚段砂岩储层物性影响较大。通过镜下薄片成岩数据的定量统计、异常压力相关数据求取和统计等手段,就 3 个因素分别探讨从而总结储层异常高孔渗带的成因机制。

3.1 溶蚀作用

渤南洼陷深部储层的溶蚀增孔作用在前人^[12-14]的诸多研究中已得到证实,并提出 3 000~5 400m

为溶蚀增孔作用的深度范围^[12];包括有机酸溶蚀、强酸性含矿深部热流体侵入在内的多种孔隙溶蚀机制^[13]。但针对不同深度范围的储层孔隙溶蚀类型

和规模、不同成因孔隙度的判别和分布没有过多的研究。本文着重探讨深部储层溶蚀颗粒类型、溶蚀规模和溶蚀成因。

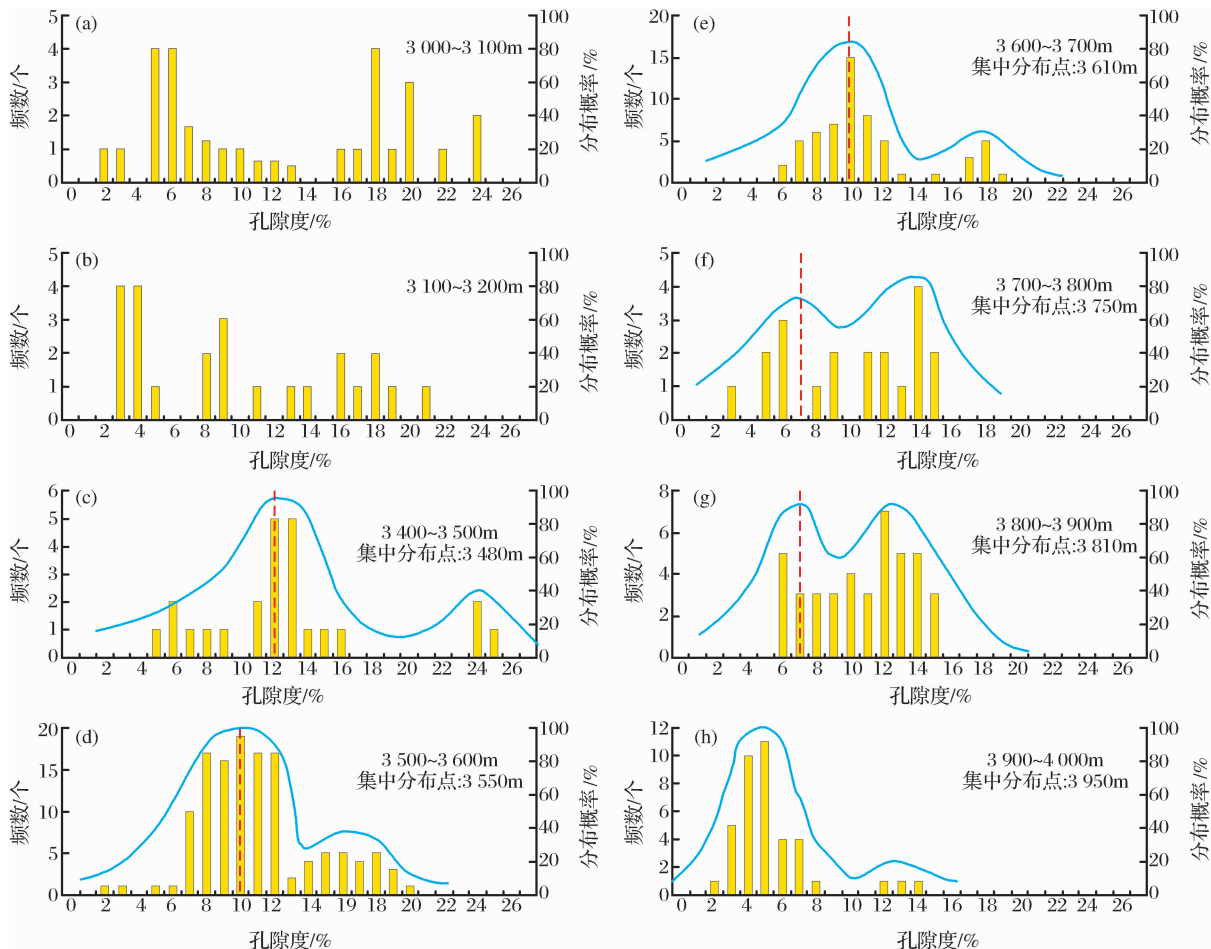


图 3 渤南洼陷沙四上亚段不同深度段的储层孔隙度分布特征

Fig. 3 The histogram of different depth reservoir porosity distribution in the Upper Es₄ Bonan Sag

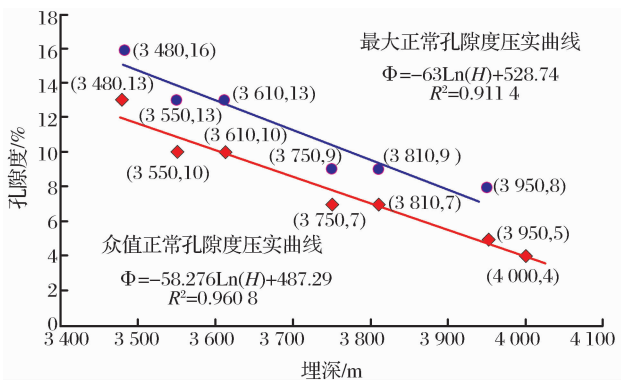


图 4 渤南洼陷沙四上亚段储层孔隙度压实拟合曲线

Fig. 4 The porosity of compaction curve of Es₄ in Bonan Sag

通过图 2 可以看出对应于 3 个显著高孔渗带的样品点分别来自于义 171 井(A 带 3 400~3 550m)、义 170 井(B 带 3 550~3 900m)和义 172 井(C 带

3 900~4 200m),结合此 3 口井的镜下微观照片可明确储层的储集空间特征和成岩面貌。镜下观察显示,异常高孔带的主要微观特征有显著的长石岩屑颗粒的溶蚀、部分烃类充填粒间孔隙和方解石等碳酸盐胶结物及杂基的相对小规模溶蚀。对不包括因烃类充注显著保存孔隙的部分进行储层溶蚀类型和相对规模的统计发现(图 5):储层面孔率由长石溶孔、岩屑溶孔、混合孔隙和原生残余孔为主,前三者占绝对比例。

渤南洼陷沙四段属渐进式的埋藏过程,期间经历喜马拉雅造山运动的 3 幕但构造抬升幅度较小^[15]。地层埋深加大,有机质演化所需的温压条件随之变优。由镜质体反射率(R_0)随深度分布图(图 6)可以看出有机质随埋深加大依次经历未成熟、低成熟、成熟、高成熟和过成熟阶段。其中低熟和高熟早期阶段

液态烃生成之前有机质干酪根分子释放外围羰基和酚基,从而为砂岩中铝硅酸盐和碳酸盐溶解提供所需的有机溶剂^[16]。渤南洼陷沙四段岩样干酪根类型为Ⅱ₁型到Ⅲ型,且以Ⅱ₁型、Ⅱ₂型为主^[17],在镜质体反射率 $R_o>1\%$ 的范围, O/C 原子比的变化较大,说明其产酸能力较强。统计对比不同深度的储层微

观特征、成岩演化、有机质演化与孔隙度发现,在前述异常高孔带的3 000~4 000m的大致范围,有机碳含量(TOC)呈现相对峰值的分布,这也正说明了有机酸溶蚀增孔的主要成因机制。埋深5 000m附近有机碳出现第二个峰值,幅度较大则相应的储层可能会发育第二个异常高孔带。

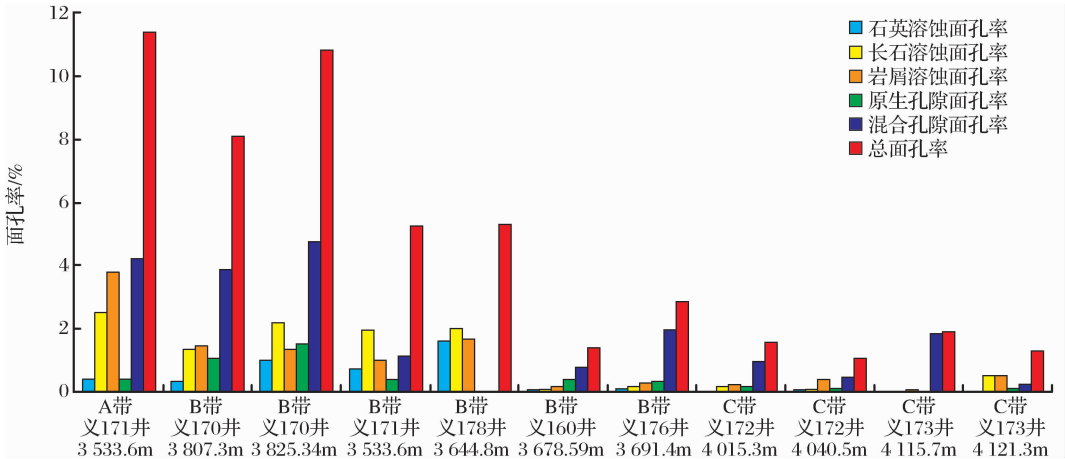


图 5 渤南洼陷沙四上亚段异常高孔带孔隙类型及面孔率分布特征

Fig. 5 Porosity types of anomalous high porosity and distribution of face rate of Es₄ in Bonan Sag

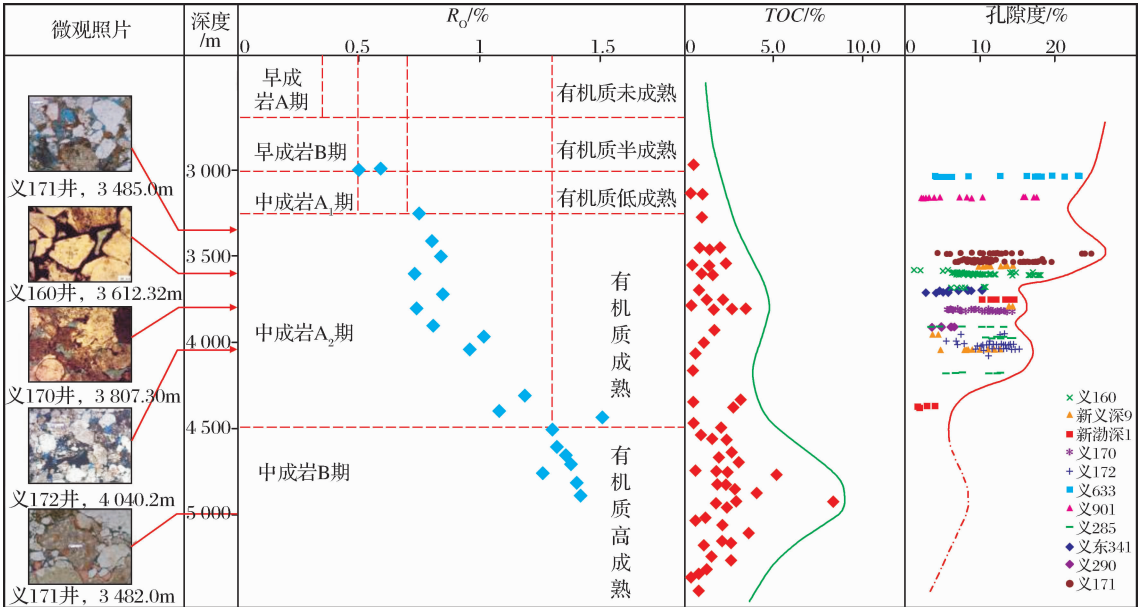


图 6 渤南洼陷沙四上亚段储层微观数据、成岩演化、有机质演化与孔隙度剖面

Fig. 6 The profile showing micro-data, diagenetic evolution, hydrocarbon evolution, porosity of Es₄ in Bonan Sag

3.2 油气充注保存孔隙

早期烃类充注事件对储层质量的影响前人做过较多研究。较为统一的观点认为油气早期充注会很大程度抑制包括石英次生加大在内的储层胶结作用的发生^[18],但不绝对^[19]。微量润湿性水环境的存在会促进无机成岩作用如颗粒表面微晶石英胶结的发

生^[20]。因此在一般情况下早期的烃类充注事件被认为是有利于储层孔隙保存的。

渤南洼陷沙四段储层自东营组沉积之后(约30Ma)到最近5Ma一直处于连续充注状态^[21]。储层微观特征显示油气充注现象显著,义171井3 485.0m、义172井4 042.0m、义160井3 612.32m和渤深4井

5 000m左右的位置均可观察到极为明显的油侵现象。具体特征如图 7(a)—图 7(c)所示,烃类呈黑色或淡黄色充填粒间及粒内孔隙中,以致储层中自生矿物仅可见极弱的石英次生加大边和部分充填粒间的碳酸盐胶结(图 7 中白色格子状填充部分,以方解石为主)。统计发现,由烃类占据的储层面孔率约为 10%~15% [图 7(d)—图 7(f)中黄色填充部分]。尽管其中仍分布有部分以方解石为主的碳酸盐胶结,烃类充注对储层

孔隙度的保孔作用仍极为显著。前人^[2]研究表明储层含油饱和度和孔隙度之间多为正相关关系。研究区因资料受限,以储层不同含油级别如油浸、油斑等来反映含油性差异。并对比不同含油级别的储层孔隙度和储层成岩胶结(以碳酸盐胶结为主)的差异(图 8)。可以看出含油性越好,储层呈现出孔隙度相对高值和碳酸盐胶结相对低值的规律。这说明油气侵入对储层孔隙度的保护和成岩胶结的抑制作用。

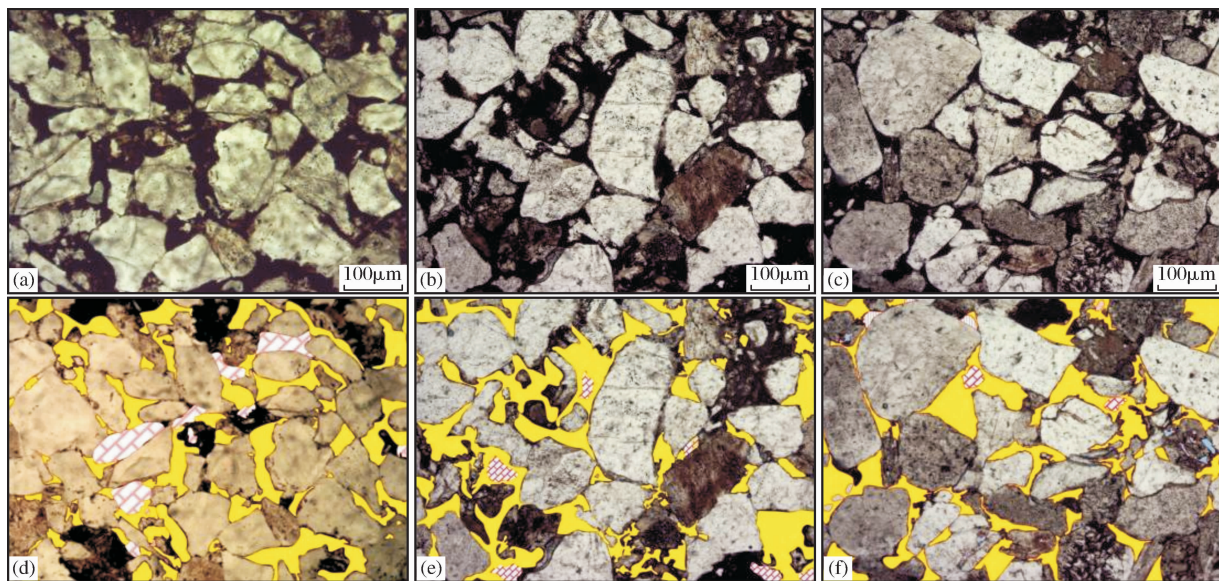


图 7 渤南洼陷沙四上亚段储层油气充注现象

Fig. 7 The phenomenon of hydrocarbon accumulation of Es₄ in Bonan Sag

(a)义 172 井,3 612.32m;(b)义 171 井,3 485.0m;(c)义 172 井,4 041.4m

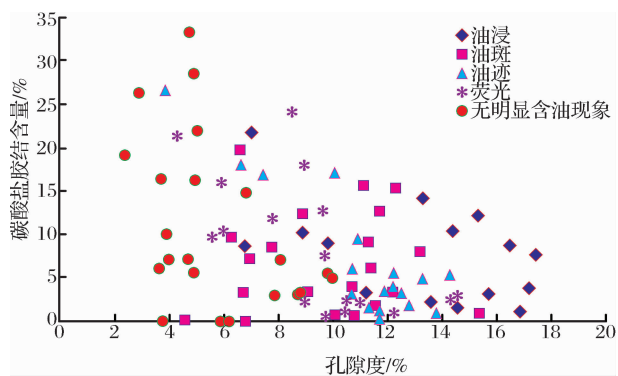


图 8 渤南洼陷沙四上亚段不同含油级别的储层孔隙度和碳酸盐胶结含量交会特征

Fig. 8 Intersection figure of porosity and carbonate cement of different oil-bearing grade of Es₄ in Bonan Sag

3.3 异常高压

前人^[22-23]的诸多研究已证明异常高压对孔隙度有良好的保护作用。超压条件下低有效应力引起的机械压实程度减弱、流体流动性减弱引起的化学胶

结作用减缓及有机酸对矿物的溶解作用使深埋超压储层保持较高的孔隙度和渗透率^[24]。

早期研究发现渤海湾盆地存在异常高压^[25]。对于渤南洼陷沙四上亚段存在异常高压的现象,多位学者^[26-29]进行过相关探讨。其中提出了以 2.35km 和 3.0km 为界的“二台阶式”异常压力分布特征^[26];不均压实作用、生烃增压和致密盐膏层的异常高压成因机制^[28]等都明确了异常高压的特征和对储层的影响。

对单井压力分带性研究发现:义 171 井沙四上亚段(约 3 400~3 800m)为异常压力带,压力系数大于 1.5。所对应的产能情况为日产油 15m³ 和日产水 0.54m³。秦润森^[29]的研究发现在埋深 3 000~4 000m 的范围静岩压力表现为明显的异常 [图 9(a)],统计此深度范围内的压力系数分布发现其大部分在 1.0~1.8 范围,呈现异常高压的特征。此深度范围正好对应于前述异常高孔渗带的分布。

异常高压对孔隙度的保存的作用明显。

通过压力系数平面分布和产能的叠合发现,渤南洼陷沙四上亚段主要的高产能井分布于义 178 井和义 160 井的异常高压中心附近(图 10)。异常高压同产能相一致的相关性关系说明了异常高压改善储层质量的作用。但从图中可以看出即使在上述 2 个异常高压中心附近,渤南断层以南的罗家鼻状构造带则相对低产。这样的现象一方面是因为原始沉积微相和砂体的差异,北部多厚层多期叠置砂岩;二是与烃源岩之间的空间距离有关,主力烃源岩中心位于渤南深洼带的沙三段和沙四上亚段^[30],距离断层北部区域较近。同时渤南断阶带一系列断层的发育对沟通流体提高储层产能有较大影响。

4 优质储层成因机理

优质储层是一个相对概念,并无孔隙度和渗透率的绝对指标^[31]。具体是指在普遍低孔隙度、低渗透率甚至致密储层中发育的物性相对较好的有效储层,优质储层的孔渗没有固定标准,根据研究区储层中含油气性及产油期状况而定^[32]。评价储层质量的基本标准便是其孔隙度和渗透率。针对不同盆地储层,诸多学者从适合本地研究和油气勘探的角度出发对于优质储层的界定范围有差异。

对碎屑岩中优质储层的提及,最早见于朱国华^[33]1992 年的文章中。其文中所指优质储层是指

深埋环境中的按照正常压实曲线和孔隙演化规律应属极差储集性能但实际为次生孔隙发育带的储层。翟永红等^[34]和顾家裕等^[35]对塔里木地区提出优质储层的形成是多种地质因素相互制约和共同起作用的结果^[34],低地温梯度、快速沉降短期深埋、酸性地层水的溶蚀、多次构造运动形成的不整合面和断裂体系改善储集性能及有利的沉积相带是优质储层形成的特定地质条件^[35]。钟大康等^[36]就中深层储层碎屑岩的优质储层做过较为系统和全面的总结,认为优质储层的形成与深部的有机酸和碳酸等流体引起的溶蚀作用、埋藏方式、异常高压、早期烃类注入、热循环对流、膏盐效应和砂泥岩互层状况等因素有关。

渤南洼陷沙四上亚段在 3 000~4 000m 深度范围储层物性表现出异常高值,同时试油成果显示此深度段具有较高产能(图 10)。其中义 160 井 3 592~3 614.3m 井段日产油量 11.6t;义 17 井 3 586~3 611m 井段日产油量 23.3t;义 170 井 3 806.1~3 829m 井段日产油量 13.2t;义 171 井 3 480.5~3 735m 井段日产油量 15t 等。对于常用的优质储层的表征参数如孔隙度、渗透率和含油气性等,深部异常高孔带可认为是优质储层的集中发育区。所以对优质储层研究一方面考虑影响其物性条件的因素,另一方面要考虑决定其含油气性的条件。此二者的研究互有联系,同一因素可同时影响储层物性和含油性且不同因素之间同样具有相互影响的关系。

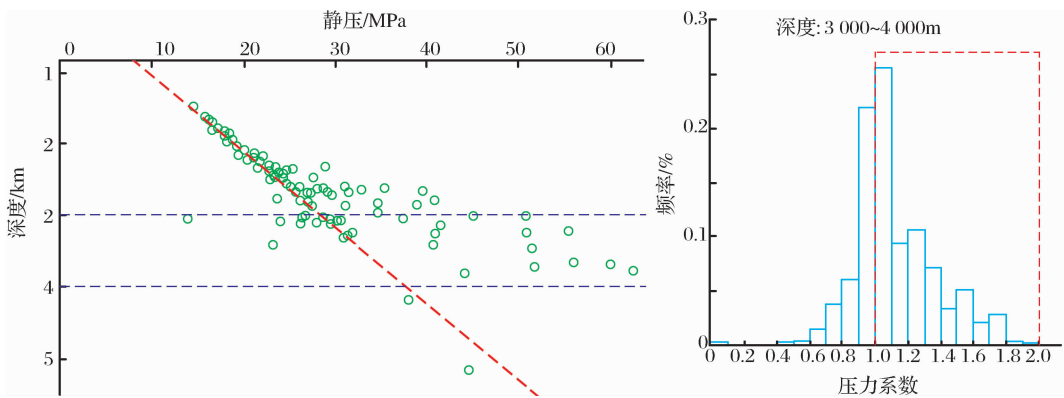


图 9 渤南洼陷沙四上亚段地层压力特征(据文献[29],有修改)

Fig. 9 The formation pressure in characteristics of Es₄ in Bonan Sag(modified from reference[29])

优质储层的形成是多因素多方面共同作用的结果。深部发育异常高孔带是优质储层的外在表现形式。异常高孔带的形成机制同样适用于阐释优质储层的形成。有机酸溶蚀增孔作用、早期油气充注的保孔作用和异常高压的保孔作用是异常高孔带形成的最直接原因。异常高孔带成因机制如溶蚀作用、

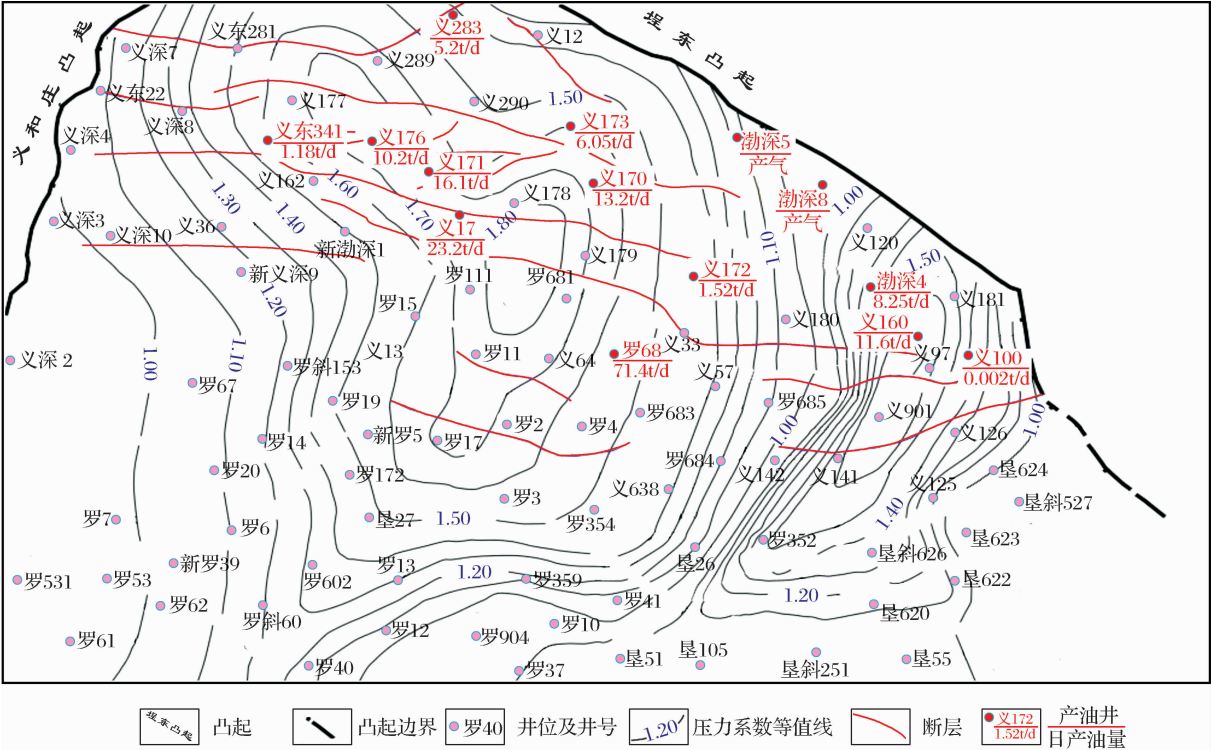
早期油气充注和异常高压通过增加或保存储层物性的方式来极大改善储层质量从而其均可视为优质储层形成的主要条件。储层溶蚀作用属后期成岩作用,早期油气充注是来自于烃源岩生排烃的影响,异常高压系伴随沉积物压实埋藏的物理过程,但除此之外,储层原始物质条件和后期构造活动如断裂对

优质储层的形成同样具有较强的控制性。在前述异常高孔带研究的基础上,从原始沉积条件和断裂发育 2 个方面完善优质储层控制条件的研究。

4.1 原始沉积条件

原始沉积因素是控制储层质量的先决条件。原始沉积的差别会影响后续的成岩压实减孔率、成岩

胶结矿物类型及规模等。因此相对优质储层的发育首先来自于相对优势的沉积微相。统计渤南洼陷不同沉积微相的储层含油气性、物性和微观特征(图 11)发现,扇三角洲前缘水下分流河道底部和分流河口砂坝顶部因粒度相对较粗、分选较好而呈现较高物性、较强溶蚀和较好的含油气性。



沉积微相内部因较强的非均质性储层同样会表现出较大差异。不同沉积微相在纵向叠置和平面分布均可由不同粒度或不同类型的岩石组成。如扇三角洲水下分流河道,其一般呈现下粗上细的正递变特征,相应地岩石特征表现为粒度的变细、分选的变差及泥质含量的增多等。由此则造成微相内部不同部位储层表现出不同的储集性能,最直观的表现体现在储层孔隙度和渗透率的差异。通过对比不同岩石组分特征的物性条件(图 12)发现中粗粒且相对高刚性颗粒(石英、长石和变质岩岩屑)的含量的砂岩储层具有相对较好的物性更易成为深埋背景下的

相对优质储层。

4.2 断裂发育

渤南洼陷断裂极其发育。北部埕南断裂为一级断层,西部义东断裂和东部孤西断裂为二级断层。此外研究区内还发育多条次级同生断层,多为 EW 走向^[37],其中渤南断阶带尤其发育(图 13)。渤南洼陷的异常高压的存在前述业已证明,异常高压和断裂共同作用形成的断—压双控流体流动机制对于沟通储层孔隙流体活动和油气运移至关重要^[38]。断裂是超压体系卸压的重要条件,与断裂沟通的砂岩体及构造背斜等是有利的勘探目标^[38]。

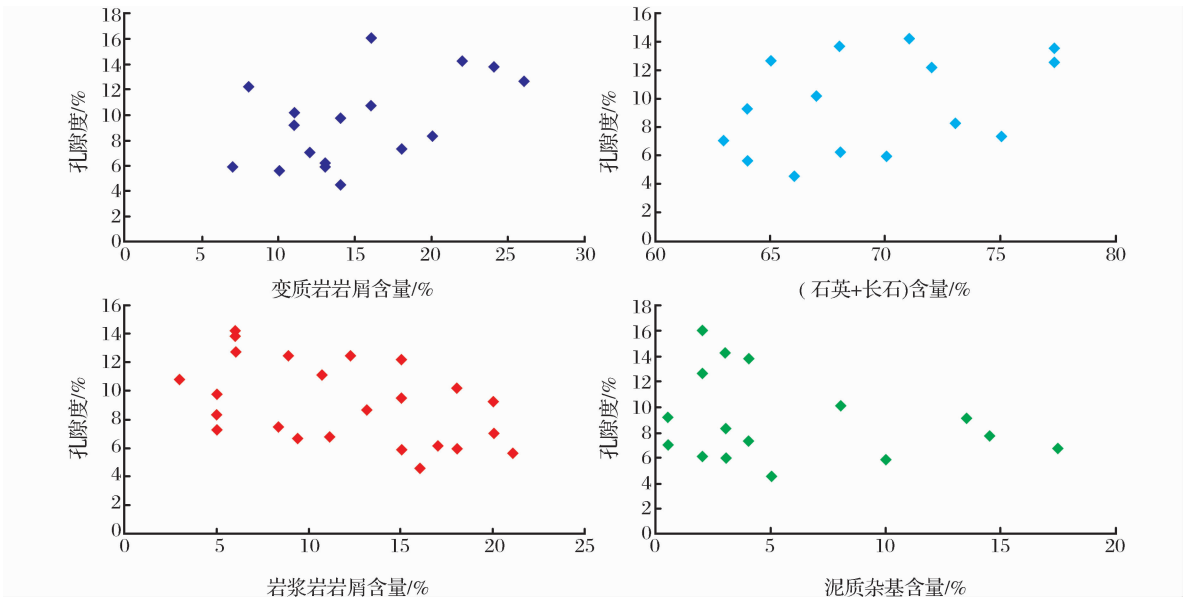


图 12 渤南洼陷沙四上亚段岩石组分含量与储层孔隙度关系

Fig. 12 The relationship between reservoir porosity and rock composition of Es₄ in Bonan Sag

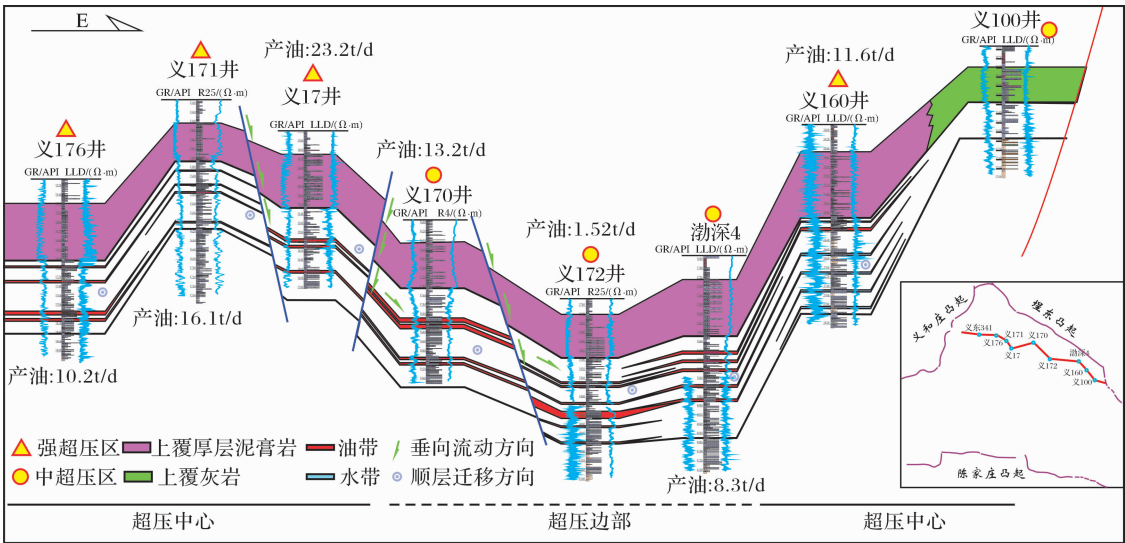


图 13 渤南洼陷沙四上亚段气藏分布剖面

Fig. 13 Profile showing the distribution of gas accumulation of Es₄ in Bonan Sag

实测压力数据显示义 160 井、义 17 井、义 171 井和义 176 井位于异常高压的中心,同样此 4 口井的实际产能数据显示其日产油量分别为 11.6t、23.2t、16.1t 和 10.2t,高于其他井位。上覆沙三段油泥岩和沙四上亚段盐岩内泥岩为主要烃源岩并提供酸性溶蚀的流体来源,2 个层段均发育有异常高压^[28]。断裂在沙四段沉积期开始发育,伴随上覆地层的沉积出现间歇性开启和封闭。层内连通砂体和断裂以及断—砂组合成为主要的卸压通道,由深注带到缓坡带顺层方向和沿断裂由上而下方向成为主要的卸压方向。由此导致超压沿断裂的幕式释放,随之孔隙流体由单一的顺层流动变为沿断裂的垂向穿层运移和顺层流体的组合,提高了迁移效率(图 13)。由此有机酸能够高效地进入储层内部完成对铝硅酸盐和碳酸盐矿物的溶蚀,改善储层质量。断—压双控流体机制对于提高流体迁移效率和活化成岩环境并由此改善储层孔渗条件有较大影响。

优质储层的形成是复杂的动态演化过程。原始沉积和后期成岩作用是主要的影响条件,一些特殊地质事件如烃类充注、异常高压等是值得首要考虑的方面。构造作用如断裂等对于流体的沟通作用以及同异常高压协同形成的断—压双控流体机制对于储层孔隙流体和油气运移有重要影响。因此,研究优质储层的形成需全面考虑各种地质条件的动态演化和影响。对于明确有利区带的勘探方向和储层成因机制有重要意义。

5 结论

(1) 渤南洼陷沙四上亚段约在 3 000~4 000m 的深度范围存在明显的异常高孔带。利用所拟合出的最大正常孔隙度—深度关系曲线来划定异常高孔带的范围,不同深度异常高孔带表现出不同的孔隙度数值。

(2) 渤南洼陷深部储层异常高孔带的发育得益于中成岩 A 期有机质低熟阶段的溶蚀增孔作用、早期烃类充注的保孔作用和自沉积初期异常高压对孔隙的保护作用。

(3) 渤南洼陷深部储层异常高孔带的发育,辅之以原始沉积因素如优势沉积微相(扇三角洲前缘水下分流河道底部和分流河口砂坝顶等)、优势岩相如中粗粒的高刚性颗粒(石英、长石和变质岩岩屑等)含量的砂岩和断裂的发育是相对优质储层形成的主要条件。

参考文献(References):

- [1] Bloch S, Lander R H, Bonnell L. Anomalous high porosity and permeability in deeply buried sandstone reservoirs: Origin and predictability[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(2): 301-328.
- [2] Tong Chuanxin, Meng Yuanlin, Xie Yuhong, *et al.* Distribution and causes analysis of the anomalously high porosity zone of the Yinggerhai Basin[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2013, 32(6): 720-727. [童传新, 孟元林, 谢玉洪, 等. 莺歌海盆地异常高孔带分布与成因分析[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2013, 32(6): 720-727.]
- [3] Zhang Yunfeng, Wang Guoqiang, Fu Baoli, *et al.* The diagenesis and the origin of abnormal high porosity zone in the deep clastic reservoir in Changling fault depression[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2011, 41(2): 372-376. [张云峰, 王国强, 付宝利, 等. 长岭断陷深层碎屑岩储层成岩作用及异常高孔带成因[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2011, 41(2): 372-376.]
- [4] Meng Yuanlin, Liu Wenhui, Meng Fanjin, *et al.* Distribution and origin of anomalously high porosity zones of the Xujiawazi fault depression in Songliao Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2011, 13(1): 75-84. [孟元林, 刘文慧, 孟凡晋, 等. 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[J]. 古地理学报, 2011, 13(1): 75-84.]
- [5] Zhang Yunfeng, Feng Yaqin, Wang Chunxiang. An analysis of abnormal high porosity zone distribution and origin in reservoir rocks in Shiwo fault depression[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2008, 32(6): 5-8. [张云峰, 冯亚琴, 王春香. 十屋断陷异常高孔带分布特征及成因[J]. 大庆石油学院学报, 2008, 32(6): 5-8.]
- [6] Gu Tuan. Characteristics of abnormally high porosity zone and favorable reservoir facies prediction in deep Cenozoic horizon of Qingshui Sag[J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(3): 327-333. [谷团. 辽河盆地西部凹陷清水洼陷新生界深层异常高孔带特征与有利储集相预测研究[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(3): 327-333.]
- [7] Cai Zhengqi, Cai Kuang, Xu Zhiming, *et al.* Carboniferous reservoir characteristics in Sanchaping buried structure in the east of Sichuan and prediction for favourable exploration area[J]. Natural Gas Geoscience, 2005, 16(6): 715-718. [蔡正旗, 蔡矿, 徐志明, 等. 川东三岔坪潜伏构造石炭系储层特征及有利区预测[J]. 天然气地球科学, 2005, 16(6): 715-718.]
- [8] Chen Yongqiao, Yu Xinghe, Zhou Xingui, *et al.* Research on diagenetic evolution succession and occurrence of secondary porosity of Lower Tertiary in different structural belt of Dongying Depression[J]. Natural Gas Geoscience, 2004, 15(1): 68-74. [陈永桥, 于兴河, 周新桂, 等. 东营凹陷各构造区带下第三系成岩演化与次生孔隙发育规律研究[J]. 天然气地球科学, 2004, 15(1): 68-74.]
- [9] Wang Qi, Bai bin, Li Xiaoyan, *et al.* Diagenetic evolution characteristics of deeply-buried clastic reservoirs, northern Qaidam Basin: A case study from well Kum 2[J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19(2): 157-164. [王琪, 白斌, 李小燕, 等. 柴达木

- 盆地北缘深部碎屑岩储层成岩演化特征研究——以昆特依凹陷昆 2 井为例[J]. 天然气地球科学, 2008, 19(2): 157-164.]
- [10] Xu Ningning, Qiu Longwei, Yang Shengchao, *et al.* Research on diagenetic evolution of the upper fourth member of Shahejie Formation reservoir in Bonan step-fault zone[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(1): 104-115. [徐宁宁, 邱隆伟, 杨生超, 等. 渤南断阶带沙四上亚段储层成岩演化研究[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(1): 104-115.]
- [11] Yuan Jing, Zhao Chenglin, Zhang Shanwen. Genetic model of the deep water salt lake of the Paleogene Sha4 member in Dongying Sag[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(1): 114-118. [袁静, 赵澄林, 张善文. 东营凹陷沙四段盐湖的深水成因模式[J]. 沉积学报, 2000, 18(1): 114-118.]
- [12] He Hong, Cai Zhongdong. Mechanism of secondary pore in Shahejie Formation of Banan Depression[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2005, 27(5): 557-559. [何宏, 蔡忠东. 渤南洼陷沙河街组次生孔隙形成机理分析[J]. 石油天然气学报, 2005, 27(5): 557-559.]
- [13] Wu Fuqiang, Xian Xuefu, Li Houshu, *et al.* Deep reservoir forming mechanism in the upper part of the fourth member of Shahejie Formation in Bonan subsag of Shengli Oil Field[J]. Acta Petrolei Sinica, 2003, 24(1): 44-48. [吴富强, 鲜学福, 李后蜀, 等. 胜利油区渤南洼陷沙四上亚段深部储层形成机理[J]. 石油学报, 2003, 24(1): 44-48.]
- [14] Wu Fuqiang, Xian Xuefu, Hu Xue, *et al.* Discussion on the forming mechanism of secondary pores: Taking Bonan subsag in Jiyang Depression as an example[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2003, 10(1): 3-5. [吴富强, 鲜学福, 胡雪, 等. 次生孔隙形成机制探讨: 以渤南洼陷为例[J]. 油气地质与采收率, 2003, 10(1): 3-5.]
- [15] Xu Xingyou, Xu Guosheng, Qin Runsen. Study on hydrocarbon migration and accumulation of member 4 of Shahejie Formation in Bonan Sag, Zhanhua Depression, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2008, 35(2): 113-120. [徐兴友, 徐国盛, 秦润森. 沾化凹陷渤南洼陷沙四段油气成藏研究[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2008, 35(2): 113-120.]
- [16] Surdam R C, Crossey L J, Hagen E S, *et al.* Organic-inorganic and sandstone diagenesis[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(1): 1-23.
- [17] Jiang Min. Study on Organic Geochemistry Features of Deep Source Rocks in Dongying, Zhanhua and Weibei Sags[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011. [姜敏. 东营、潍北及沾化凹陷深层烃源岩有机地球化学特征研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.]
- [18] Luo Jinglan, Liu Xiaohong, Lin Tong, *et al.* Impact of diagenesis and hydrocarbon emplacement on sandstone reservoir quality of the Yanchang Formation(Upper Triassic) in the Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(5): 664-673. [罗静兰, 刘小洪, 林潼, 等. 成岩作用与油气侵位对鄂尔多斯盆地延长组砂岩储层物性的影响[J]. 地质学报, 2006, 80(5): 664-673.]
- [19] Yan Jianping, Liu Chiyang, Ma Yanping. Influence of diagenesis and hydrocarbon emplacement on the quality of the Fuyang reservoir in Songliao Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(2): 212-220. [闫建萍, 刘池阳, 马艳萍. 成岩作用与油气侵位对松辽盆地齐家—古龙凹陷扶杨油层物性的影响[J]. 沉积学报, 2009, 27(2): 212-220.]
- [20] Maast T E, Jahren J, Bjørlykke K. Diagenetic controls on reservoir quality in Middle to Upper Jurassic sandstones in the South Bjørlykke Viking Graben, North Sea[J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(11): 1883-1905.
- [21] Gong Xiumei, Jin Zhijun, Zeng Jianhui, *et al.* Reservoir characteristics and main controlling factors for deep hydrocarbon accumulations in Bonan sag in Jiyang Depression[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(4): 473-479. [宫秀梅, 金之钧, 曾澥辉, 等. 渤南洼陷深层油气成藏特征及主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(4): 473-479.]
- [22] Xiao Lihua, Gao Yunting, Tian Weizhi, *et al.* The retardation of mechanical compaction in clastic rocks by overpressure and the prediction model for porosity[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2011, 30(4): 400-406. [肖丽华, 高煜婷, 田伟志, 等. 超压对碎屑岩机械压实作用的抑制与孔隙度预测[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2011, 30(4): 400-406.]
- [23] Ramm M, Bjørlykke K. Porosity/depth trends in reservoir sandstones: Assessing the quantitative effects of varying pore-pressure, temperature history and mineralogy, Norwegian Shelf data[J]. Clay Minerals, 1994, 29(4): 475-490.
- [24] Hao Fang, Zou Huayao, Ni Jianhua, *et al.* Evolution of overpressured systems in sedimentary basins and conditions for deep oil/gas accumulation[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2002, 27(5): 610-615. [郝芳, 邹华耀, 倪建华, 等. 沉积盆地超压系统演化与深层油气成藏条件[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2002, 27(5): 610-615.]
- [25] Xie Xinong, Liu Xiaofeng, Zhao Shibao, *et al.* Fluid flow and hydrocarbon migration pathways in abnormally pressured environments[J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2004, 29(5): 589-595. [解习农, 刘晓峰, 赵士宝, 等. 异常压力环境下流体活动及其油气运移主通道分析[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2004, 29(5): 589-595.]
- [26] Liu Hua, Jiang Youlu, Gu Guocui, *et al.* Pressure characteristics and formation mechanisms of Paleogene in Bonan Sag, Zhanhua Depression[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2013, 37(4): 46-51. [刘华, 蒋有录, 谷国翠, 等. 沾化凹陷渤南洼陷古近系压力特征及成因机制[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2013, 37(4): 46-51.]
- [27] Wang Yanzhong, Cao Yingchang, Li Yongxin, *et al.* Controlling factors on the Paleogene deep effective reservoirs in the Bonan Sag[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(6): 996-1003. [王艳忠, 操应长, 李永新, 等. 渤南洼陷古近系深层有效储层控制因素研究[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(6): 996-1003.]
- [28] Wang Tianfu, Cao Yingchang, Wang Yanzhong. Characteristic and origin of the abnormal pressure in the deep Paleogene formation in Bonan Sub-sag[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2009, 24(2): 21-25. [王天福, 操应长, 王艳忠. 渤南洼陷古近系深层异常压力特征及成因[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2009, 24(2): 21-25.]
- [29] Qin Runsen. Hydrocarbon Distribution Based on the Characteristic of Paleogene in Bonan Sag[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2013, 37(4): 46-51. [秦润森. 渤南洼陷古近系深层异常压力特征及成因[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2013, 37(4): 46-51.]

- teristics of Current Pressure Field, Es₄ formation in Bonan Sag[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008. [秦润森. 沾化凹陷渤南洼陷沙四段段现今压力场特征及其与油气分布关系[D]. 成都: 成都理工大学, 2008.]
- [30] Wu Fuqiang, Li Houshu, Hu Xue, *et al.* An approach to the composite petroleum systems of Es₄ in Bonan Sag, Shengli oil province [J]. Petroleum Exploration and Development, 2002, 29(3): 29-31. [吴富强, 李后蜀, 胡雪, 等. 渤南洼陷沙四上亚段含油气系统探讨[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(3): 29-31.]
- [31] Wang Duoyun, Zheng Ximin, Li Fengjie, *et al.* Forming condition of high-quality reservoir and its relative problems in low porosity and permeability enrichment zone [J]. Natural Gas Geoscience, 2003, 14(2): 87-91. [王多云, 郑希民, 李凤杰, 等. 低孔渗油气富集区优质储层形成条件及相关问题[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(2): 87-91.]
- [32] Yang Xiaoping, Zhao Wenzhi, Zou Caineng, *et al.* Origin of low-permeability reservoir and distribution of favorable reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4): 57-61. [杨晓萍, 赵文智, 邹才能, 等. 低渗透储层成因机理及优质储层形成与分布[J]. 石油学报, 2007, 28(4): 57-61.]
- [33] Zhu Guohua. Origin and evolution and prediction of porosity in clastic reservoir rocks [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1992, 10(3): 114-123. [朱国华. 碎屑岩储集层孔隙的形成、演化和预测[J]. 沉积学报, 1992, 10(3): 114-123.]
- [34] Zhai Yonghong, Guo Jianhua, Liu Shengguo, *et al.* Study on the origine of quality clastic rocks reservoir in Carboniferous from Tazhong area [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 1996, 16(2): 55-61. [翟永红, 郭建华, 刘生国. 塔中石炭系碎屑岩深埋藏优质储层成因探讨[J]. 矿物岩石, 1996, 16(2): 55-61.]
- [35] Gu Jiayu, Ning Congqian, Jia Jinhua. High quality reservoir features and genetie analysis of clastic rocks in the Tarim Basin [J]. Geological Review, 1998, 44(1): 83-89. [顾家裕, 宁从前, 贾进华. 塔里木盆地碎屑岩优质储层特征及成因分析[J]. 地质论评, 1998, 44(1): 83-89.]
- [36] Zhong Dakang, Zhu Xiaomin, Wang Hongjun. Characteristic and formation mechanism of deep buried clastic reservoir [J]. Science in China: Series D, 2008, 38(supplement 1): 11-18. [钟大康, 朱筱敏, 王红军. 中国深层优质碎屑岩储层特征与形成机理分析[J]. 中国科学: D 辑, 2008, 38(增刊 1): 11-18.]
- [37] Zhang Yu. The controlling role of syndepositional fault structural slope-break zone to depositional system in Bonan Sub-sag [J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 2010, 41(5): 860-865. [张宇. 渤南洼陷同沉积断裂构造坡折带对沉积的控制作用[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2010, 41(5): 860-865.]
- [38] Chen Zhonghong, Zha Ming. Mechanism of overpressured fluid compartment and its controlling on hydrocarbon migration and accumulation in faulted lacustrine basin; A case study from the Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2008, 43(1): 50-64. [陈中红, 查明. 断陷湖盆超压封存箱形成机理与油气成藏机制——以渤海湾盆地东营凹陷为例[J]. 地质科学, 2008, 43(1): 50-64.]

Anomalous High Porosity Zone and Formation Mechanism of High Quality Reservoir of Es₄ in Bonan Sag

QIU Long-wei¹, XU Ning-ning¹, LIU Kui-yuan², YANG Sheng-chao¹, XIE Chao¹, SHAN Bao-jie², WU Yu-xi³

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao 266555, China;

2. Hekou Production Plant of Shengli Oil Field Corporation, Dongying 257200, China;

3. Institute of Geology, Dongxin Production Plant of Shengli Oil Field Corporation, Dongying 257094, China)

Abstract: The research indicated a distinct anomalous high porosity zone of Es₄ in 3 000-4 000m depth range in Bonan Sag. Combined with core physical property data, the paper identified normal and abnormal porosity distribution, utilizing the distribution of reservoir porosity in continuous interval depth and curves of porosity changing with depth. Integrated with thin section data, scanning electron microscopy analysis and formation pressure data, the paper explained reasons for high porosity and permeability zone by aspects of diagenetic erosion, abnormal high pressure and hydrocarbon charging at early stage. Combined with micro-facies, lithofacies, development fracture, the paper discussed the genetic mechanism of high quality reservoir. The result suggests that anomalous high porosity zone in reservoir was benefited by protection of overpressure, organic acid dissolution and hydrocarbon emplacement at early stage. The main conditions of high quality reservoir were as followings: development of anomalous high porosity zone; original deposition factors such as advantage facies (underwater distribution channel and mouth bar in fan delta front), relatively high proportion of mid-coarse rigid particles (quartz, feldspar and metamorphic fragments) and fracture development.

Key words: Bonan Sag; The upper 4th member of Shahejie Formation; Anomalous high porosity zone; High quality reservoir