

引用格式:王永诗,张鹏飞,王学军,等.济阳拗陷成熟探区油气精细勘探理论进展与实践[J].油气地质与采收率,2024,31(4):13-23.

WANG Yongshi, ZHANG Pengfei, WANG Xuejun, et al. Theoretical progress and practice of refined oil and gas exploration in mature exploration area of Jiyang Depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(4): 13-23.

## 济阳拗陷成熟探区油气精细勘探理论进展与实践

王永诗<sup>1</sup>,张鹏飞<sup>1</sup>,王学军<sup>2</sup>,郝雪峰<sup>2</sup>,熊伟<sup>2</sup>,安天下<sup>2</sup>

(1.中国石化胜利油田分公司,山东东营 257000; 2.中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院,山东东营 257015)

**摘要:**济阳拗陷作为渤海湾盆地成熟探区之一,经过了60多年勘探开发,为实现油气勘探的持续发展,亟需解决油气资源潜力、勘探方向及成藏规律等理论认识问题。通过对主力生烃层系大量烃源岩样品沉积环境、有机地球化学特征的分析测试及生排烃模拟实验,对比研究了不同类型烃源岩生排烃演化过程及生烃潜力,发现咸化环境烃源岩具有古生产力高、活化能低的特点,建立了陆相湖盆“咸化富烃”生排烃模式,突破了以淡水环境烃源岩为主力油气来源的传统认识;通过分析深层储层成岩演化过程中孔隙度与地层流体酸碱性质变化的关系,指出“早期强胶结、后期强溶蚀”是深层储层形成大量次生溶蚀孔隙的重要原因,解决了高地温背景下深层碎屑岩有效储层成因问题;基于济阳拗陷勘探实践,总结提出了断陷盆地从洼陷带到斜坡带,依次发育岩性、构造-岩性、岩性-构造及构造油气藏的油气藏类型有序分布规律。创新形成了“咸化富烃、酸碱控储、有序成藏”的成熟探区油气精细勘探理论认识,明确了剩余资源潜力,指出了深层的勘探方向,使油气勘探由被动转移转为主动探索;并创新建立了适用于精细勘探阶段的“勘探单元”划分、优选方法,形成了成熟探区“七步走”的精细勘探评价流程。结合济阳拗陷地质新认识、最新一轮油气资源评价结果,指出今后重点勘探方向及增储领域,为油田的长期效益可持续发展提供了重要保障。

**关键词:**咸化环境;成岩流体;精细勘探;成熟探区;济阳拗陷

文章编号:1009-9603(2024)04-0013-11

DOI:10.13673/j.pgre.202405012

中图分类号:TE13

文献标识码:A

## Theoretical progress and practice of refined oil and gas exploration in mature exploration area of Jiyang Depression

WANG Yongshi<sup>1</sup>, ZHANG Pengfei<sup>1</sup>, WANG Xuejun<sup>2</sup>, HAO Xuefeng<sup>2</sup>, XIONG Wei<sup>2</sup>, AN Tianxia<sup>2</sup>

(1. Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257000, China; 2. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257015, China)

**Abstract:** Jiyang Depression, as one of the mature exploration areas in Bohai Bay Basin, has been explored and developed for over 60 years. It is urgent to solve the theoretical understanding problems such as oil and gas resource potential, exploration direction, and accumulation law to realize the sustainable development of oil and gas exploration. The evolution process of hydrocarbon generation and hydrocarbon generation potential of different types of source rocks were compared based on the analysis and testing of the sedimentary environment and organic geochemical characteristics of a large number of source rock samples in the primary hydrocarbon-generating strata and the hydrocarbon generation simulation experiment. It is found that the source rocks in the saline environment have the characteristics of high ancient productivity and low activation energy, and a “saline and hydrocarbon-rich” hydrocarbon generation and expulsion mode was established in the continental lake basin. It breaks through the traditional understanding that source rock in freshwater environments is the primary source of oil and gas. It is pointed out that “strong cementation in early stage and strong dissolution in late stage” are the essential reasons for the formation of a large number of secondary dissolu-

收稿日期:2024-05-08。

作者简介:王永诗(1964—),男,山东邹平人,正高级工程师,博士,从事油气地质综合研究与勘探管理工作。E-mail:wangysh623@sina.com。

基金项目:中国石化科技攻关项目“济阳陡坡带深层砂砾岩油气富集机制与勘探方向”(P21034-1)。

tion pores in the deep reservoirs by analyzing the relationship between porosity and acid-base properties of formation fluid during diagenetic evolution of deep reservoirs. The genetic problem of effective reservoirs of deep clastic rocks under a high geothermal background is solved. The paper summarizes and puts forward the orderly distribution of lithology, structure-lithology, lithology-structure, and tectonic reservoirs from subsag to slope zones based on the exploration practice in Jiyang Depression. Therefore, the theoretical understanding of refined oil and gas exploration in mature exploration areas of “saline and hydrocarbon-rich, acid-base control, and orderly accumulation” has been innovated, and the potential of remaining resources has been defined. The direction of deep exploration has been pointed out, so oil and gas exploration has changed from passive transfer to active exploration. The division and optimization method of the “exploration layer unit” suitable for the refined exploration stage is innovatively established, and a “seven-step” refined exploration and evaluation process is formed for mature exploration areas. The paper points out the critical exploration directions and fields with increasing reserves in the future, which provide essential guarantees for the long-term benefit and sustainable development of the oilfield based on the new geological understanding of Jiyang Depression and the results of the latest round of oil and gas resource evaluation.

**Key words:** saline environment; diagenetic fluid; refined exploration; mature exploration area; Jiyang Depression

中国东部发育 300 余个陆相断陷盆地<sup>[1-2]</sup>, 总面积达二百万平方公里以上, 是世界上最大的陆相含油气盆地集中分布区, 也是中国重要的油气产区。虽然目前部分已进入中高勘探程度阶段, 但仍是重要的原油生产基地, 每年仍可为国家贡献占比为 40% 左右的原油产量, 对于保障国家能源具有不可或缺的地位<sup>[3]</sup>。但这些断陷盆地作为勘探老区, 油气发现程度的不断提高导致其持续增储普遍面临着资源潜力、勘探方向及成藏规律等诸多难题<sup>[4]</sup>。

以渤海湾盆地济阳拗陷为例, 1961 年 4 月 15 日东营凹陷东营构造华 8 井在古近系获得日产油量为 8.1 t/d 的工业油流, 揭开了胜利油田发现的序幕。在经过 60 余年的勘探开发历程后, 油气发现程度较高<sup>[5]</sup>, 制约油田持续发展的难题包括以下 3 个方面: 一是油气资源发现率高。按传统生油理论认识, 截至 2010 年油气资源发现率已达 78.9%, 剩余资源量有限, 可持续发展面临困境; 二是中浅层勘探程度高。济阳拗陷 90% 以上探明石油地质储量集中在中浅层(埋深小于 3 500 m), 深层是否有较大勘探潜力尚不清楚; 三是前期地质认识对当前勘探部署缺乏有效指导, 勘探目标发现越来越困难。胜利油田地质工作者瞄准关键问题持续攻关, 创新形成了以“咸化富烃、酸碱控储、有序成藏”为核心的断陷盆地油气精细勘探理论认识, 认为以济阳拗陷为代表的东部勘探程度较高的老油区应具有较大的勘探潜力, 形成的油气精细勘探理论进展及其指导下的实践有效支撑了济阳拗陷的持续稳定增储, 对整个东部陆相断陷盆地的油气勘探也具有重要的借鉴意义。

## 1 地质背景

济阳拗陷地处渤海湾盆地的东南部, 是在前古

近系基底之上发育的断陷盆地(图 1), 总体呈北南超的箕状断陷特征。受内部凸起的分隔, 发育东营凹陷、沾化凹陷、车镇凹陷和惠民凹陷等 4 个次级构造单元; 具有多套生油层系、多期演化成烃、沉积体系类型多样、油气藏类型复杂的特点。截至 2019 年底, 济阳拗陷发现太古宇一新近系明化镇组等 10 余套含油层系, 共计发现了 73 个油气田, 上报探明石油地质储量近  $56 \times 10^8 \text{ t}$ <sup>[3,5]</sup>。济阳拗陷整体三维地震覆盖率超过 90%, 甚至二次、三次覆盖富油凹陷, 探井密度达到 0.23 口/km<sup>2</sup>, 探明程度超过 50%, 已达到成熟勘探阶段。作为增储主体的沙四段上亚段及以上中浅部成熟层系的勘探程度越来越高, 勘探目标日趋碎小、隐蔽、复杂, 沙四段下亚段及以下的深层处于主力烃源岩层系之下, 勘探程度较低, 油气成藏及分布规律认识程度较低, 但勘探证实具有较大的勘探潜力, 是下步规模增储的重要方向, 需要系统开展深层石油地质规律的深入研究, 为深层勘探提供理论指导。

## 2 油气精细勘探理论进展

### 2.1 基于陆相湖盆“咸化富烃”模式的油气资源量新认识

#### 2.1.1 陆相咸化湖泊环境下烃源岩有机质富集特征

传统生油理论认为陆相生油母质以淡水环境分散有机质为主, 济阳拗陷一直以淡水环境的沙三段为“主力”烃源岩<sup>[6-7]</sup>。但最新的已发现油气来源分析结果显示, 东营凹陷累计上报探明石油地质储量中有 73.5% 来自于沙四段上亚段咸化环境烃源岩, 这与沙三段中、下亚段为主要烃源岩的传统认识存在矛盾。上述问题表明济阳拗陷咸化环境烃源岩

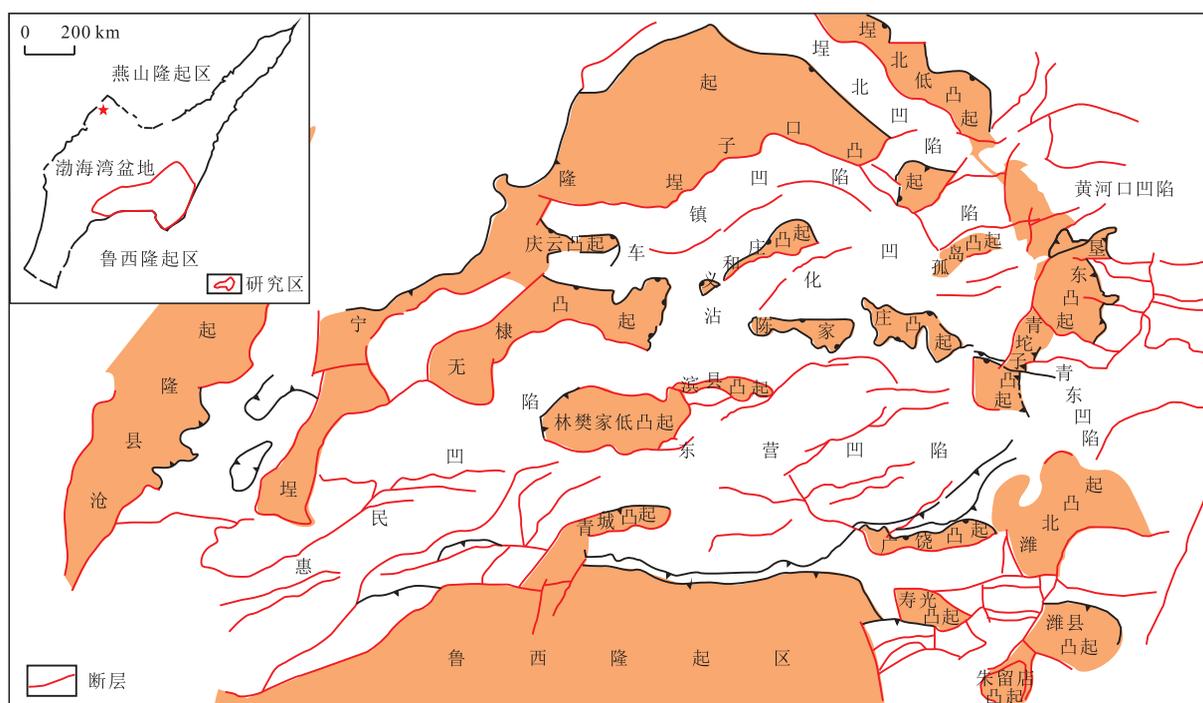


图1 济阳拗陷区域构造位置  
Fig.1 Tectonic location of Jiyang Depression

的形成机制及资源潜力需重新认识。在沉积环境认识基础上,通过深层探井沙河街组钾、钠等元素分析,发现自孔店组沉积时期以来,湖泊的水体咸度呈逐渐变淡的趋势,孔店组一沙四段下亚段沉积时期、沙四段上亚段一沙三段下亚段沉积时期、沙三段中亚段沉积时期、沙三段上亚段沉积时期湖盆水体条件具有盐湖、咸化湖、微咸水-淡水环境的变化特点。基于新的湖泊环境认识,开展了咸化环境烃源岩(沙四段)系统研究,发现了咸化环境生烃母质多为嗜盐菌藻类,古生产力较高,约为 $1\ 100\sim 4\ 100\text{ gC/m}^2/\text{y}$ ,是淡水环境下藻类生产力的 $3\sim 10$ 倍。此外,受盐度较高的影响,咸化湖盆的水体会呈现分层的特征,下部具有利于有机质保存的高咸化环境,相较于淡水湖盆,咸化湖盆中有机质埋藏效率要高出约 $23\%\sim 25.9\%$ ,形成的有机质多呈层状富集<sup>[8]</sup>(图2),这也成为咸化环境烃源岩高效生烃的物质基础。

### 2.1.2 咸化环境烃源岩生排烃机制

通过大量的分析测试研究,发现咸化环境有机质以非共价键缔合结构为主,占比约为 $75\%$ ,活化能约为 $177\sim 198\text{ KJ/mol}$ ,而淡水环境条件下富集的有机质以共价键方式缔合为主,占比超过 $80\%$ ,导致其活化能要高于咸化环境有机质,约为 $190\sim 223\text{ KJ/mol}$ ,咸化环境有机质的活化能较淡水环境低 $10\sim 20\text{ KJ/mol}$ ,易于生烃(图3)。同时,咸化环境烃源岩

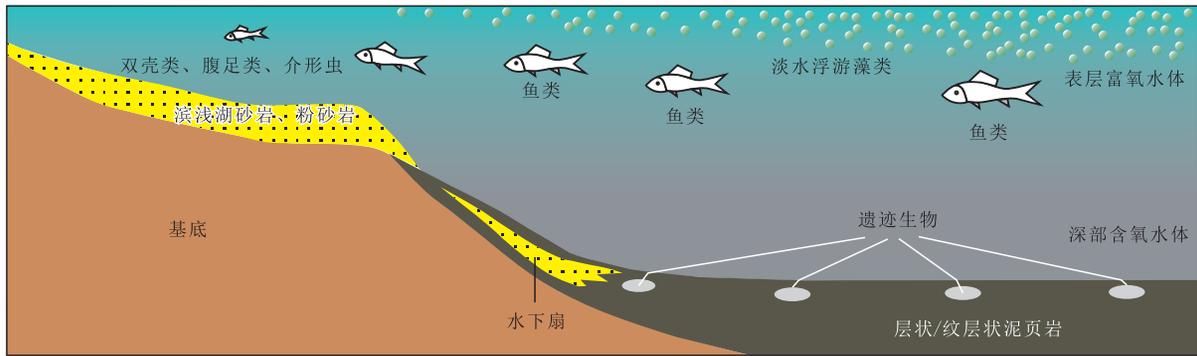
在埋深大于 $2\ 500\sim 3\ 000\text{ m}$ 之后,内部的碳酸盐发生颗粒增大和重结晶过程,导致烃源岩的脆性程度逐渐升高,在异常高压背景下,大量微裂隙发育形成排烃通道,使得咸化烃源岩更易于排烃。因此,上述条件控制咸化环境烃源岩生排烃的过程较淡水环境烃源岩更加高效。

### 2.1.3 咸化环境烃源岩生排烃模式

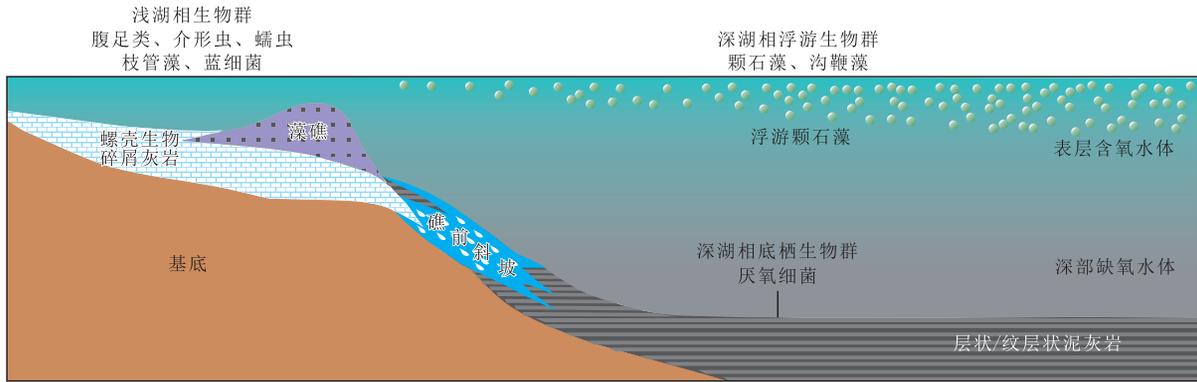
不同水体环境下烃源岩生排烃模拟实验结果表明,咸水和淡水环境烃源岩生排烃模式存在明显差别,具体体现在二者的排烃门限深度分别约为 $2\ 500$ 和 $3\ 000\text{ m}$ ,咸化环境烃源岩的排烃门限要浅 $500\text{ m}$ ,导致其排烃量增加 $20\%$ 以上(图4)。基于该模式以及油源判识结果,认为济阳拗陷古近系主力烃源岩应是沙四段沉积时期咸化环境发育的烃源岩,而并非是传统认为的沙三段淡水环境发育的烃源岩。通过油气资源评价关键参数厘定和资源量重新计算,济阳拗陷的剩余油气资源量较以往增加了 $18\times 10^8\text{ t}$ ,仍具备较大的油气资源基础。

## 2.2 深层“酸碱控储”模式明确深层碎屑岩有效储层成因

前人对深层优质储层的研究多关注于构造作用形成的裂缝带以及碳酸盐岩中的溶蚀孔洞,普遍认为深层碎屑岩严重致密化,不发育有效储层。深层碎屑岩缺乏优质储层的传统认识一直制约着济阳拗陷的深层油气勘探<sup>[9-10]</sup>。而大量的勘探实践研



a.微咸水-淡水湖泊烃源岩古生产力



b.咸化湖泊烃源岩古生产力

图2 东营凹陷不同类型湖泊环境沉积物及古生态模式

Fig.2 Sediments and paleoecological modes in different lake environments in Dongying Sag

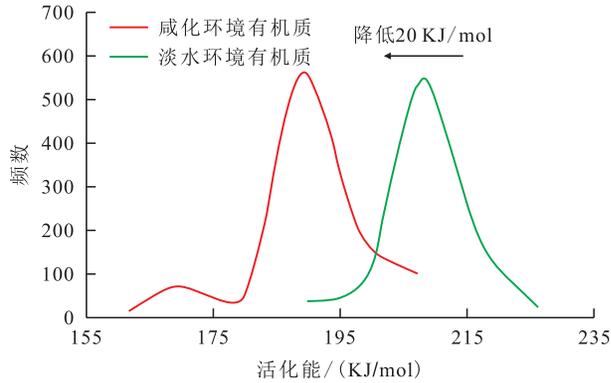


图3 不同环境烃源岩活化能对比

Fig.3 Comparison of activation energies of source rocks in different environments

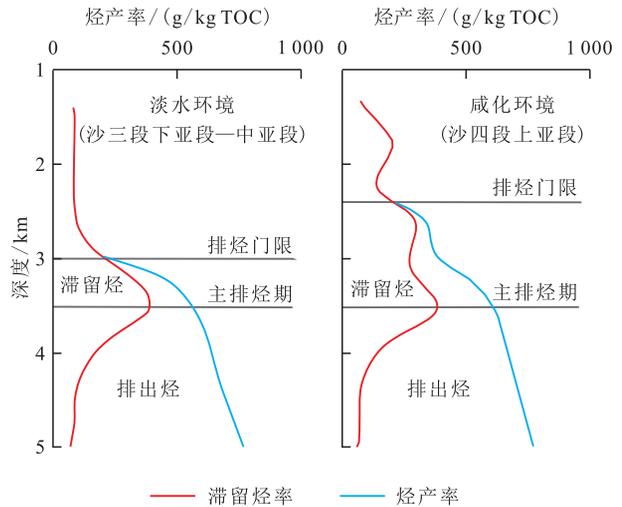


图4 淡水环境与咸化环境烃源岩生排烃模式对比

Fig.4 Comparison of hydrocarbon generation and expulsion modes of source rocks in freshwater environment and saline environments

究表明,深层是否能够形成有效储层取决于成岩流体演化条件。

### 2.2.1 深层成岩流体演化序列

前已述及,受古湖盆水体环境变化控制,济阳坳陷在古近系沙四段下亚段咸化湖泊中发育烃源岩和多套膏岩间互沉积,同时在沙四段上亚段和沙三段下亚段咸化湖泊中也发育较优质的烃源岩<sup>[11]</sup>(图5a)。随埋深的增加,石膏的演化过程为 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (生石膏) $\rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ (熟石膏) $\rightarrow \text{CaSO}_4$ (硬石膏),各阶段的演化对应的温度界限分别为42、90和150℃,且演化过程中不断脱出吸附水和

束缚水等碱性流体<sup>[12-14]</sup>。伴随地温升高,烃源岩有机质生成有机酸达到酸浓度高值所对应的温度范围分别为60~140和75~90℃;在80~120℃时最有利于有机酸的保存,低于80℃时形成的有机酸会被细菌分解,高于120℃时有机酸脱羧形成烃类和CO<sub>2</sub>等产物,在高于160℃时会全部转化为CO<sub>2</sub><sup>[13,15-16]</sup>。含膏层系成岩演化排出碱性流体和烃

源岩生烃演化排出酸性流体(图5b), 流体性质的变化必然导致在储层埋藏演化的不同阶段发生不同矿物的胶结或溶蚀, 这是深层储层发育演化的流体条件。

2.2.2 深层酸碱流体交替控储机制

大量的镜下薄片鉴定及胶结物同位素研究结果表明, 深层碎屑岩储层受原始盐度较高的孔隙水控制, 在成岩初期颗粒间多发育碳酸盐胶结物, 抑制了储层的压实作用, 在保留的原始孔隙中, 受后期酸性流体的注入, 造成碳酸盐胶结物以及长石等硅酸盐颗粒的溶蚀而发育次生溶蚀孔隙; 但随着时间推移, 更多的酸性流体使得溶蚀空间增大并与酸性流体的幕式注入配合, 具有“早期强胶结、后期强溶蚀”成岩演化特征, 在成岩中后期可形成大量溶蚀孔隙(图6)。这类储层的孔隙度超过10%, 可作为有效储层, 也意味着深层“酸碱控储”条件能够形成大规模有效储层。

2.2.3 深层碎屑岩有效储层成因

基于酸碱流体交替控储机制, 创建深层碎屑岩有效储层发育模式(图7), 在原始地层流体为碱性条件下, 随着成岩演化过程中烃类生成有机酸的不不断增加, 直至水岩反应导致酸性流体消耗殆尽, 深

层碎屑岩储层会存在溶蚀作用较发育段。济阳拗陷埋深3 500 m以下深层碎屑岩可形成次生孔隙发育带。“酸碱控储”与“咸化富烃”匹配, 使济阳拗陷勘探深度至少向下拓展了1 500 m, 向深层规模勘探成为可能。2011年以来深层新增石油地质储量为 $5.9 \times 10^8$  t, 占同期新增石油地质储量的37.3%, 证实深层具有聚集大规模油气的储层条件。

2.3 油气“有序成藏”模式揭示断陷盆地区带成藏规律

济阳拗陷前期油气成藏认识以二级正向构造或负向构造背景下的油气藏分布规律研究为主, 主要偏向于阐述油气静态要素分布及组合特征, 解决断陷盆地二级构造带内发育油气藏类型的问题<sup>[17-19]</sup>。但随着二级构造带背景下油气藏的发现程度越来越高, 传统的油气成藏理论在指导未发现的复杂隐蔽油气藏勘探时表现出不适用性, 需要从全盆地、全层系等多尺度、从油气成藏动态协同的角度, 揭示油气富集机制与分布规律, 从而解决不同类型油气藏空间上的成藏规律预测问题。

2.3.1 油气分布的有序性

勘探实践表明, 断陷盆地的构造沉降和沉积充填控制了盆地内部不同尺度下油气成藏要素的有

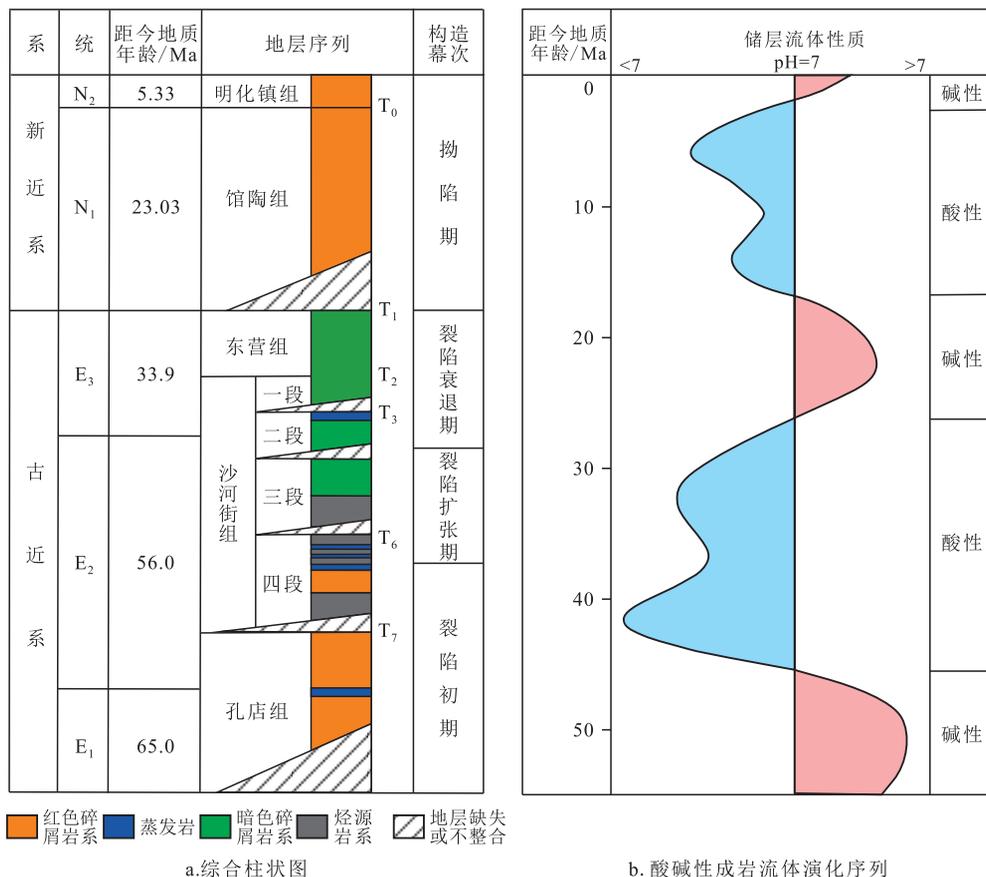


图5 济阳拗陷古近系综合柱状图及酸碱性成岩流体演化序列

Fig.5 Comprehensive histogram and fluid evolution sequence of acid-base diagenesis of the Paleogene in Jiyang Depression

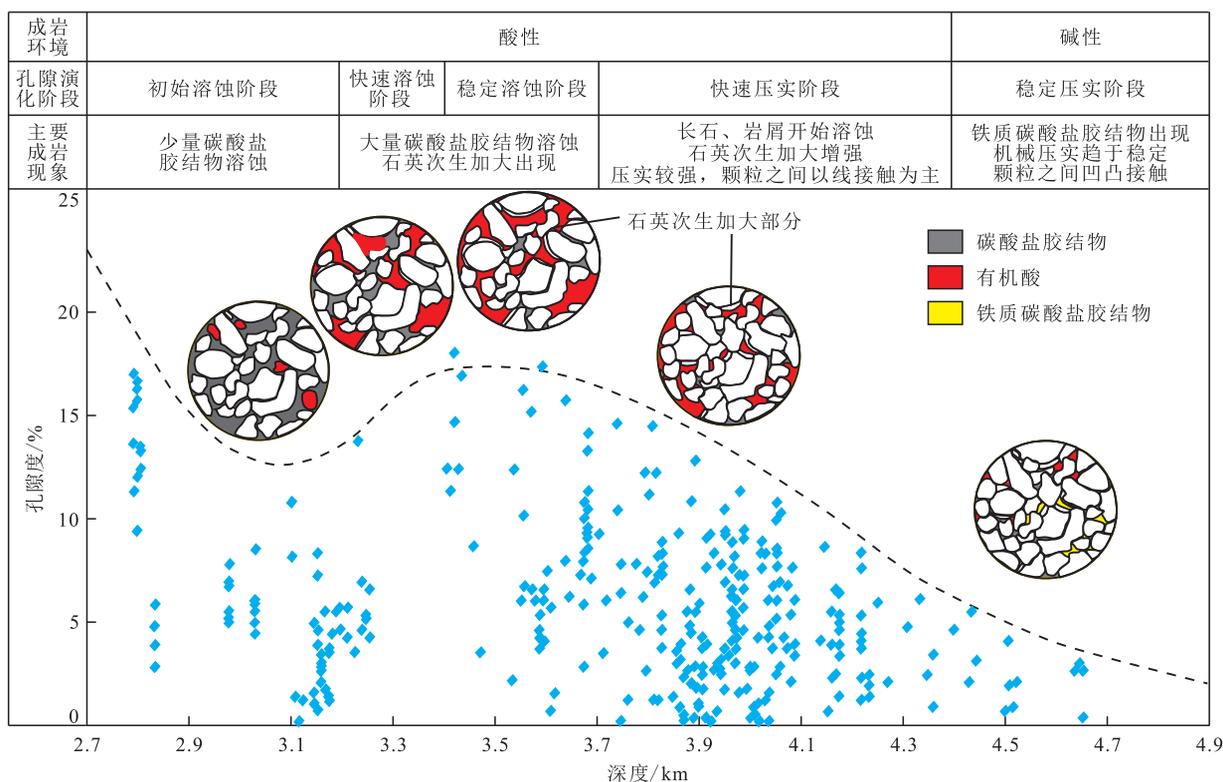


图6 济阳坳陷深层碎屑岩储层孔隙演化阶段划分

Fig.6 Evolution stages of reservoir pores of deep clastic rock in Jiyang Depression

序发育,进而控制油气分布的有序特征。从盆地尺度来看,由洼陷带向陡坡和缓坡盆缘方向,依次发育岩性、构造-岩性、岩性-构造及构造油气藏(图8a),且这些不同类型油气藏的属性也呈现出依次减小的有序分布趋势<sup>[20-21]</sup>。此外,断陷盆地油气分布的有序性在单个凹陷、凹陷内单一构造区带、构造区带中单一沉积体系等尺度均具有普遍性。以东营凹陷沙三段三角洲沉积体系为例,从洼陷带向边缘方向,即从三角洲的前三角洲亚相、前缘亚相及平原亚相依次发育岩性、构造-岩性及构造油气藏(图8b)。

### 2.3.2 油气差异富集机理

区域地质应力场控制盆地不同构造单元的沉降、沉积充填特征以及以此为基础的水-岩作用过程差异,决定了不同构造带压力、流体、储集性等成藏要素以不同的耦合方式进行协同演化,进而控制油气藏富集样式的差异性。盆地尺度下发育3种类型的“压力-流体-储集性”协同演化模式,即洼陷带超压-酸性流体-中低孔渗模式、缓坡带常压-弱碱性流体-高孔渗模式、陡坡带弱超压-酸/碱性流体-中低孔渗模式。“压力-流体-储集性”协同演化模式与油气藏类型、属性参数具有良好对应性,分别控制不同构造带不同类型油气藏的差异富集<sup>[1,22]</sup>(图9)。

油气“有序成藏”理论不同方面的内涵对于勘

探实践具有不同的指导意义。具有相似演化结构的盆地其油气差异富集关键要素也具有一定的相似性,意味着同类型油气藏的勘探思路、方法和技术能够相互借鉴;而盆地不同尺度下油气“有序成藏”的分布规律,可以指导在成熟探区(层系)中的储量空白区有针对性的寻找特定的油气藏<sup>[23]</sup>;而不同类型油气藏间富集模式的差异,则意味着需要针对性的开展关键控藏要素的评价和技术攻关,这也是精细勘探阶段油气藏评价的基本原则和方针。

## 3 油气精细勘探实践

### 3.1 勘探层单元的概念、划分及优选方法

#### 3.1.1 勘探层单元的概念

为更好地满足地质研究和勘探工作的开展,在含油气盆地的不同勘探阶段需要有针对性的、合理的地质单元划分方案。以往济阳坳陷主要按照二级构造带进行勘探单元的划分和评价,如在隐蔽油气藏勘探阶段,勘探单元划分主要是先将凹陷划分为陡坡带、洼陷带、中央隆起带和缓坡带,再进一步将不同构造带的构造体系与所发育的沉积体系相叠合作为勘探单元。随着勘探的逐步深入,这样的划分尺度已无法满足油气精细勘探的需要,结合精细勘探阶段对单元纵向和横向尺度上的需求,胜利

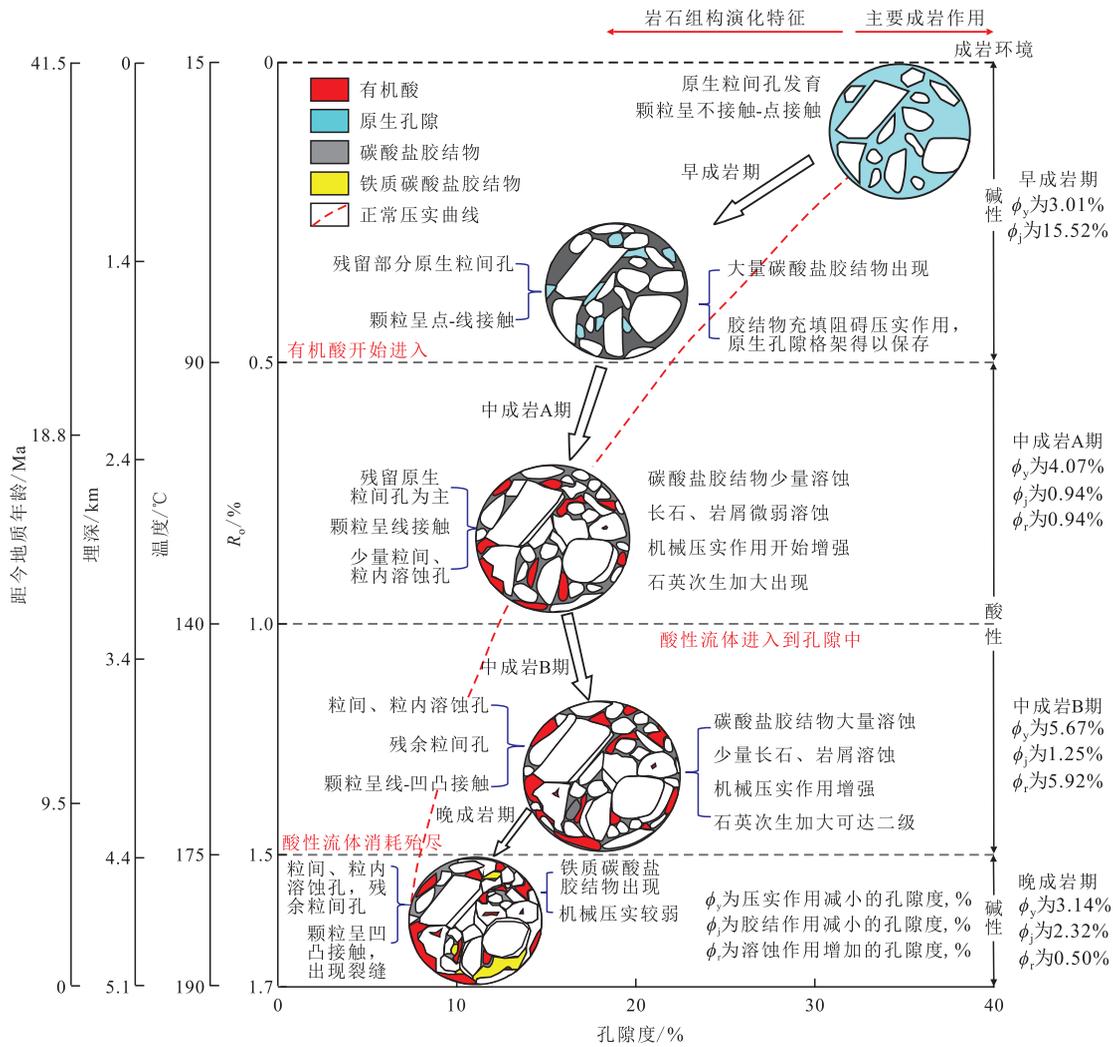


图7 深层碎屑岩储集体成岩作用与孔隙演化模式

Fig.7 Diagenesis and pore evolution mode of deep clastic rock reservoir

油田地质工作者创新提出了勘探层单元的概念。勘探层单元是同一构造层或构造亚层中,以二、三级构造带为基础,综合考虑地质特征、勘探程度和认识程度来划分的,具有相对统一的沉积体系、构造体系、油气成藏体系的潜力地质单元<sup>[3]</sup>。

### 3.1.2 勘探层单元的划分及优选方法

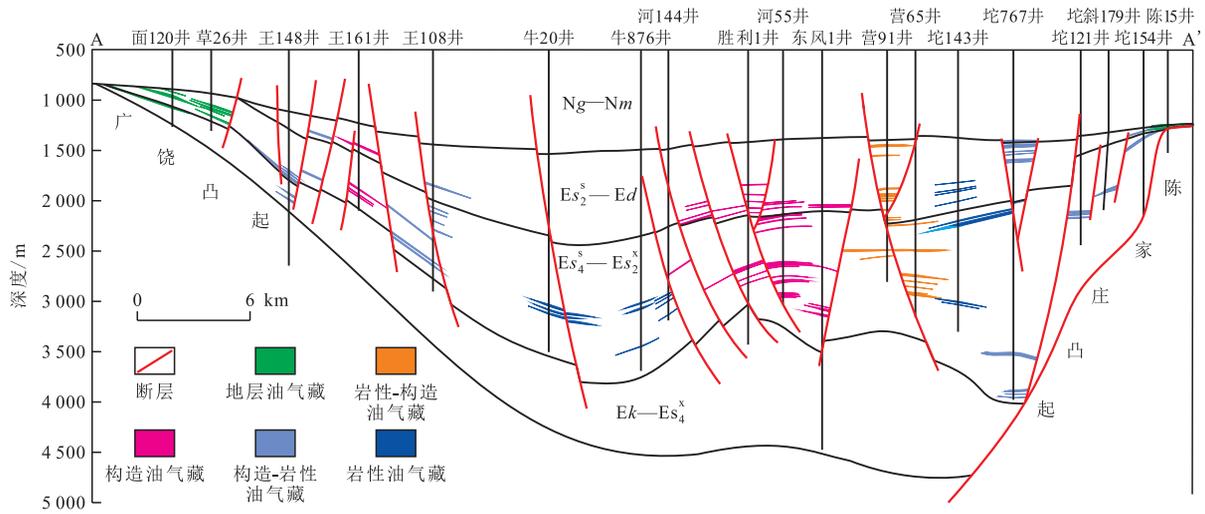
油气精细勘探阶段勘探层单元的划分突出表现在纵向上和横向上均开展了单元的细化。纵向上,考虑盆地长期勘探过程中,各构造层系成因背景及油气发现程度的差异来划分纵向单元;横向上,结合长期的地质认识,在原有二、三级构造带基础上,从沉积体系完整性和差异性角度划分沉积尺度的单元,在其内部再进一步以油气成藏运聚要素的差异进行细化,得到油气运聚的单元。纵向与横向单元的组合叠加,即可获得盆地的勘探层单元划分结果。依据上述划分思路和原则,济阳拗陷自太古界基底至新近系明化镇组共计可以划分出9套层

系、305个勘探层单元<sup>[24-25]</sup>。

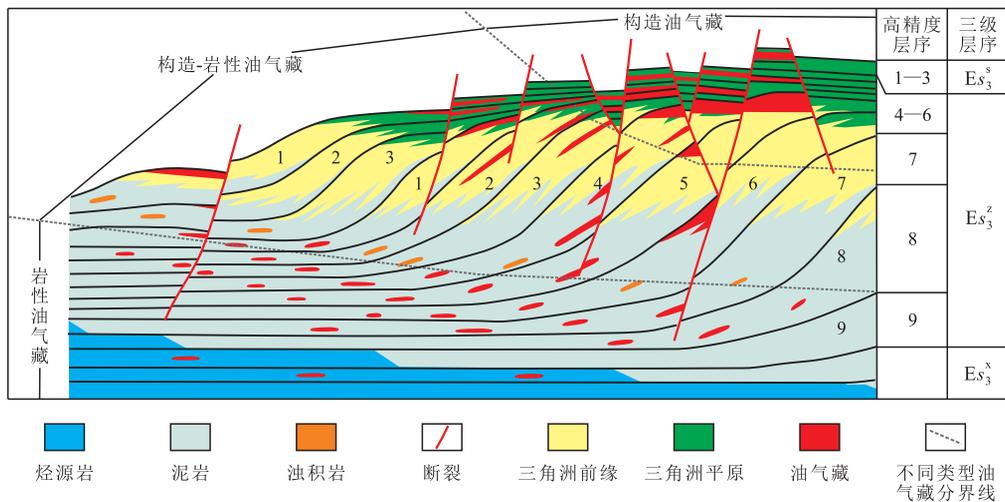
在精细勘探阶段油气发现程度高、勘探难度大的背景下,为突出对不同勘探层单元勘探部署的质量和效益,以勘探层单元的地质认识、已有的勘探评价技术、各单元剩余的资源潜力和预期的经济效益为指标,对划分出的305个勘探层单元进行综合排序及优选,确定当前及未来一段时期内主要的勘探对象。基于建立的优选方法,针对济阳拗陷共计优选出200余个勘探层单元,作为下一步勘探的重点。

### 3.2 精细勘探评价流程

在济阳拗陷较长的勘探历程中,针对区带优选、部署思路、评价方法等研究工作得到了长期积累和迭代提升,以济阳拗陷为工区,以勘探层单元划分为基础,形成了成熟探区“七步走”的精细勘探评价流程:①明序列,通过盆地构造背景及沉积规律的研究,明确盆地油气藏的分布规律。②选方



a.东营凹陷不同油气藏类型分布



b.东营凹陷沙三段三角洲沉积体系油气藏类型分布

图8 断陷盆地油气藏有序分布模式

Fig.8 Orderly distribution of reservoirs in faulted basin

向,以地质统计学为手段,预测油气剩余资源的分布,从地质风险、技术适应和经济效益等维度,综合优选有利勘探层单元(图10)。

③查失利,对潜力区内的失利井开展解剖分析,查明失利原因。

④建模型,重新建立构造、沉积、储层、成藏模型,编绘大比例尺的地质图件。

⑤析主因,将已发现油气藏与建立的地质模型进行两两叠合,分析潜力区油气藏的主控因素。

⑥找目标,针对确定的靶区,利用高精度成像、地质-地球物理一体化综合解释等勘探技术,寻找勘探目标。

⑦探油气,最终以油层保护、酸化压裂等工程技术确保油气发现。

### 3.3 实践效果

#### 3.3.1 指导油气勘探发现

“十三五”以来,在油气精细勘探理论指导下,运用勘探层单元优选目标,实施精细勘探评价,有效提高了勘探质量和成效。优选区块实施率与探

井成功率逐年上升,区块实施率由2016年的60%上升至“十四五”以来年均80%以上,评价井工业油流率由2016年47.5%上升至2023年的60%以上;沙四段上亚段及以上成熟层系稳定增储,取得了埕岛地区馆陶组河道砂、滨县南坡沙四段上亚段滩坝砂等12个商业发现,累计新增探明石油地质储量22 700×10<sup>4</sup>t;“三新”领域取得博兴洼陷孔店组、埕岛地区前古近系潜山等5个油气发现,累计新增石油地质储量12 300×10<sup>4</sup> t;济阳坳陷老油区持续有规模发现,新发现3个3 000×10<sup>4</sup> t级以上规模储量区块,新发现6个1 000×10<sup>4</sup> t级以上规模储量区块,为保障年产量2 340×10<sup>4</sup> t稳定提供了资源支撑。

#### 3.3.2 明确未来发展方向

最新油气资源评价结果表明,济阳坳陷成熟探区常规油气资源量(不含已经上报的探明、控制、预测石油地质储量)仍有近50×10<sup>8</sup> t以上,具有巨大的

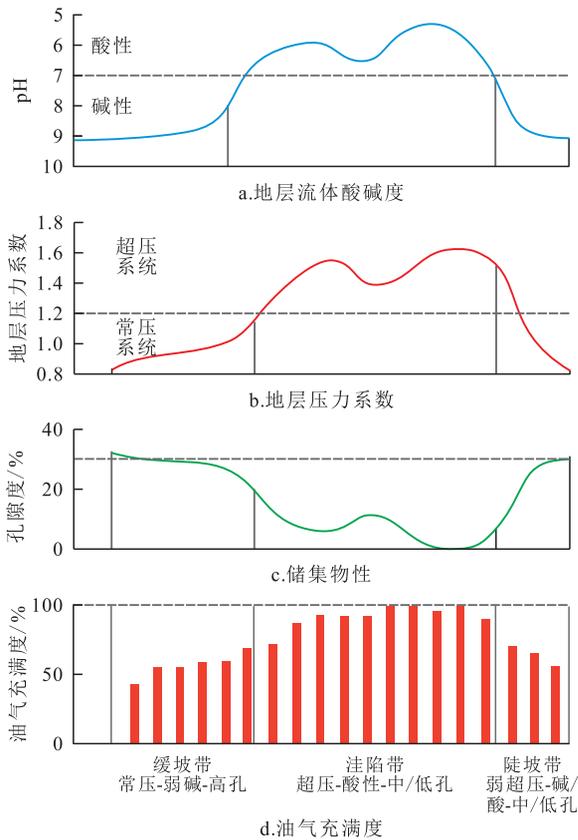


图9 济阳拗陷古近系油气成藏要素协同演化控藏模式  
 Fig.9 Co-evolution and reservoir controlling model of Palaeogene hydrocarbon accumulation factors in Jiyang Depression

勘探潜力。其中沙四段上亚段及以上成熟层系剩余资源仍较雄厚,主要分布在探明石油地质储量外的“空白区”,这些“空白区”主要分布在构造转换带、沉积结合部、地层超剥区,存在大量的探井“出油点”,为勘探潜力区。按照油气精细勘探理论,分层系开展成藏条件与油气富集规律研究,精细评价落实增储规模,“空白区”仍将是胜利油田稳定增储的压舱石;成化富烃认识的提出使得深层资源量增加了 $18 \times 10^8 \text{t}$ ,实践证实深层具有规模增储的潜力。加强深层原型盆地恢复、有效储层评价及油气成藏综合评价,积极探索,孔店组—沙四段下亚段有望成为重要的规模增储领域<sup>[26]</sup>。前古近系深层潜山、

内幕潜山勘探程度、认识程度低,勘探实践表明下古生界深层潜山、太古宇潜山内幕发育有效储层,具有石炭系—二叠系烃源岩、古近系烃源岩等多套烃源岩,加强有效圈闭刻画及油气运聚条件评价,实施风险勘探及预探,前古近系潜山将是油气高产勘探方向。另外,随着页岩油勘探的突破,成熟探区勘探战略、思路及方法发生了显著变化,遵循“立足全区、决胜深层、常非并重、统筹推进”勘探思路,推动成熟探区多领域勘探,实现济阳拗陷持续稳定增储<sup>[27]</sup>。

### 4 结论

济阳拗陷复杂多样的石油地质特征,赋予其较大的勘探潜力,也决定了勘探过程中地质认识要不断创新才能实现新突破,与此相匹配以科学的区带划分方案和勘探程序,开展高质量的勘探。在济阳拗陷传统油气成藏理论认识基础上,取得了以下进展:

(1)突破了湖相烃源岩传统生烃认识,创建了成化环境烃源岩有机质丰度高、早生早排、生烃期长、排烃效率高的生排烃模式,通过计算济阳拗陷剩余油气资源量,较以往增加了 $18 \times 10^8 \text{t}$ ,回答了东部断陷盆地高勘探程度区勘探潜力问题。

(2)突破了深层碎屑岩物性变差的认识,揭示了成化沉积成岩过程中“酸碱流体交替”控制优质储层的形成机制,指出济阳拗陷断陷初始期成化沉积环境形成的盐膏层、烃源岩及二者在后期深埋演化过程中酸、碱性流体的排出及相互作用控制了深层优质储层发育,回答了高勘探程度区勘探方向问题。

(3)突破了复式油气聚集的传统认识,揭示“压力-流体-储集性”及其相互作用是断陷盆地油气藏分布有序性和油气富集差异性的内在机制,形成了断陷盆地油气“有序成藏”理论。以油气差异富集

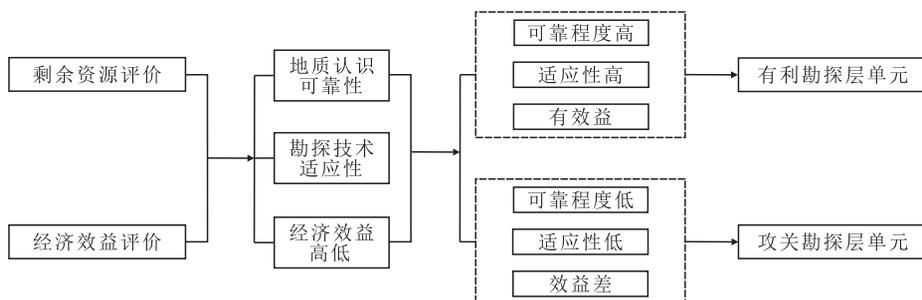


图10 勘探层单元评价优选流程  
 Fig.10 Evaluation and optimization processes of exploration layer units

规律认识为基础,结合高勘探程度区已发现油气藏类型分布序列完整性的分析,有效指导了油气精细勘探目标选区,回答了高勘探程度区油气富集规律问题。

(4)综合考虑地质特征、勘探程度和认识程度,开展勘探层单元划分及优选,在此基础上形成了成熟探区“七步走”的精细勘探评价流程,保证了探区油气勘探的效益发展。

中国东部陆相断陷盆地具有相似的油气地质背景,济阳坳陷在油气精细勘探阶段实现的持续稳定增储也表明东部勘探程度较高的老油区都应具有较大的勘探潜力,形成的精细勘探理论进展可以作为东部陆相断陷盆地油气勘探的借鉴。

#### 参考文献

- [1] 王永诗,郝雪峰,胡阳. 富油凹陷油气分布有序性与富集差异性——以渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷为例[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(5): 785-794.  
WANG Yongshi, HAO Xuefeng, HU Yang. Orderly distribution and differential enrichment of hydrocarbon in oil-rich sags: a case study of Dongying Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, East China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(5): 785-794.
- [2] 邹才能,张光亚,陶士振,等. 全球油气勘探领域地质特征、重大发现及非常规石油地质[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(2): 129-145.  
ZOU Caineng, ZHANG Guangya, TAO Shizhen, et al. Geological features, major discoveries and unconventional petroleum geology in the global petroleum exploration [J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(2): 129-145.
- [3] 宋明水. 济阳坳陷勘探形势与展望[J]. 中国石油勘探, 2018, 23(3): 11-17.  
SONG Mingshui. The exploration status and outlook of Jiyang depression [J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(3): 11-17.
- [4] 张宇,刘超英,程喆. 中国石化东部断陷盆地成熟探区勘探转型发展探讨[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(3): 12-22.  
ZHANG Yu, LIU Chaoying, CHENG Zhe. Discussion on exploration transformation and development of mature exploration areas in eastern fault basins of Sinopec [J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(3): 12-22.
- [5] 王永诗,李友强. 胜利油区东部探区“十二五”中后期勘探形势与对策[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(4): 5-9.  
WANG Yongshi, LI Youqiang. The exploration situation and countermeasures in the late 12th Five-Year Plan in the eastern area of Shengli oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(4): 5-9.
- [6] 刘庆,张林晔,王茹,等. 湖相烃源岩原始有机质恢复与生排烃效率定量研究——以东营凹陷古近系沙河街组四段优质烃源岩为例[J]. 地质论评, 2014, 60(4): 877-883.  
LIU Qing, ZHANG Linye, WANG Ru, et al. Recovery of original organic matter content and quantitatively study of generation and expulsion efficiency for lacustrine hydrocarbon source rocks: a case study of the excellent source rocks of the Palaeocene E<sub>2-3</sub>S<sub>4</sub>, Dongying Sag [J]. Geological Review, 2014, 60(4): 877-883.
- [7] 巢前,蔡进功,周祺盛,等. 东营凹陷沙河街组 E<sub>3</sub>/E<sub>4</sub> 烃源岩热解特征及生烃差异研究[J]. 高校地质学报, 2017, 23(4): 688-696.  
CHAO Qian, CAI Jingong, ZHOU Qisheng, et al. Characteristics of rock-eval pyrolysis and hydrocarbon generation for source rocks of Eocene Shahejie third and fourth members, Dongying depression [J]. Geological Journal of China Universities, 2017, 23(4): 688-696.
- [8] 赵悦,蔡进功,谢奥博,等. 淡水和咸水湖相泥质烃源岩不同赋存态有机质的地球化学特征[J]. 石油实验地质, 2018, 40(5): 705-715.  
ZHAO Yue, CAI Jingong, XIE Aobo, et al. Geochemical investigation of organic matter of various occurrences released via sequential treatment of two argillaceous source rock samples from fresh and saline lacustrine environments [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2018, 40(5): 705-715.
- [9] 王永诗,王勇,朱德顺,等. 东营凹陷北部陡坡带砂砾岩优质储层成因[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(2): 28-36.  
WANG Yongshi, WANG Yong, ZHU Deshun, et al. Genetic mechanism of high-quality glutenite reservoirs at the steep slope in northern Dongying sag [J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(2): 28-36.
- [10] 李继岩,宋国奇,王晓蕾,等. 不同沉积环境形成的储层成岩差异性研究——以东营凹陷王家岗地区红层与博兴洼陷灰层滩坝为例[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(2): 269-276.  
LI Jiyan, SONG Guoqi, WANG Xiaolei, et al. Study on the differences of diagenetic evolution under different sedimentary environment: take an example of the red-beds of Wangjiagang, Dongying Sag and oligocene gray-beds beach-bar of Boxing sag [J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(2): 269-276.
- [11] 李宇志,周肖肖,隋风贵,等. 东营凹陷民丰地区沙四段下亚段烃源岩特征[J]. 油气地质与采收率, 2023, 30(3): 28-41.  
LI Yuzhi, ZHOU Xiaoxiao, SUI Fenggui, et al. Characteristics of source rock of E<sub>4</sub><sup>s</sup> in Minfeng area, Dongying Sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(3): 28-41.
- [12] 李继岩. 渤海湾盆地东营凹陷东段红层储层成岩环境时空演化及成岩孔隙演化[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(1): 90-97.  
LI Jiyan. Temporal-spatial evolution of diagenetic environment and diagenesis pore evolutionary process of red beds in the eastern Dongying sag, Bohai bay basin [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(1): 90-97.
- [13] 贾光华. 东营凹陷南坡古近系红层砂体储层特征及控制因素[J]. 东北石油大学学报, 2013, 37(3): 48-58.  
JIA Guanghua. Reservoir characteristic and control factors of Paleogene red sandstones in southern slope of Dongying sag [J].

- Journal of Northeast Petroleum University, 2013, 37(3): 48-58.
- [14] 操应长, 杨田, 宋明水, 等. 陆相断陷湖盆低渗透碎屑岩储层特征及相对优质储层成因——以济阳坳陷东营凹陷古近系为例[J]. 石油学报, 2018, 39(7): 727-743.  
CAO Yingchang, YANG Tian, SONG Mingshui, et al. Characteristics of low-permeability clastic reservoirs and genesis of relatively high-quality reservoirs in the continental rift lake basin: a case study of Paleogene in the Dongying sag, Jiyang Depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(7): 727-743.
- [15] 王永诗, 王勇, 郝雪峰, 等. 深层复杂储集体优质储层形成机理与油气成藏——以济阳坳陷东营凹陷古近系为例[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(4): 490-498.  
WANG Yongshi, WANG Yong, HAO Xuefeng, et al. Genetic mechanism and hydrocarbon accumulation of quality reservoir in deep and complicated reservoir rocks: a case from the Palaeogene in Dongying Sag, Jiyang Depression [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(4): 490-498.
- [16] 伍松柏. 砂岩储层不同产状自生高岭石成因机制及其储层改造意义——以东营凹陷沙河街组为例[J]. 油气地质与采收率, 2023, 30(5): 12-21.  
WU Songbai. Genetic mechanism of authigenic kaolinite with different occurrence in sandstone reservoirs: a case of Shahejie Formation in Dongying Sag [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(5): 12-21.
- [17] 胡见义, 徐树宝, 童晓光. 渤海湾盆地复式油气聚集区(带)的形成和分布[J]. 石油勘探与开发, 1986, 13(1): 1-8.  
HU Jianyi, XU Shubao, TONG Xiaoguang. Formation and distribution of complex petroleum accumulation zones in Hohaiwan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 1986, 13(1): 1-8.
- [18] 李德生. 渤海湾盆地复合油气田的开发前景[J]. 石油学报, 1986, 7(1): 1-21.  
LI Desheng. Prospect of the composite megastructural oil and gas fields in Bohai Bay Basin of China [J]. Acta Petrolei Sinica, 1986, 7(1): 1-21.
- [19] 李丕龙, 张善文, 宋国奇, 等. 断陷盆地隐蔽油气藏形成机制——以渤海湾盆地济阳坳陷为例[J]. 石油实验地质, 2004, 26(1): 3-10.  
LI Pilong, ZHANG Shanwen, SONG Guoqi, et al. Forming mechanism of subtle oil pools in fault basins-taking the Jiyang Depression of the Bohaiwan Basin as an example [J]. Petroleum Experimental Geology & Experiment, 2004, 26(1): 3-10.
- [20] 郝雪峰. 陆相断陷盆地沉积相律与油藏类型序列类比分析[J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(5): 1-2, 6.  
HAO Xuefeng. Analogy of the sedimentary facies rule & pool type succession in continental rifted basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2006, 13(5): 1-2, 6.
- [21] 郝雪峰, 尹丽娟, 林璐. 济阳坳陷油藏类型及属性分布有序性[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(1): 8-13.  
HAO Xuefeng, YIN Lijuan, LIN Lu. Ordered distribution of reservoir type and its attributes in Jiyang depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(1): 8-13.
- [22] 王永诗, 郝雪峰, 安天下, 等. 盆地结构控制下的地层压力-流体-储集性协同演化及控藏作用——以东营凹陷古近系为例[J]. 石油学报, 2023, 44(7): 1 058-1 071, 1 150.  
WANG Yongshi, HAO Xuefeng, AN Tianxia, et al. Co-evolution of formation pressure, fluid, and reservoir property under the control of basin structure and its controlling effect on reservoir accumulation: a case study of Paleogene in Dongying depression [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(7): 1 058-1 071, 1 150.
- [23] 王永诗. 济阳坳陷不同领域油气勘探思路与方向[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(5): 1-12.  
WANG Yongshi. Ideas and directions for oil and gas exploration in different fields of Jiyang depression, Bohai Bay Basin, China [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(5): 1-12.
- [24] 宋明水, 王永诗, 王学军, 等. 成熟探区“勘探单元”研究及其在渤海湾盆地东营凹陷的应用[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(3): 499-513.  
SONG Mingshui, WANG Yongshi, WANG Xuejun, et al. Research of “synthem units of exploration” in mature exploration area and its application in the Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 499-513.
- [25] 宋明水, 李友强. 济阳坳陷油气精细勘探评价及实践[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(1): 93-101.  
SONG Mingshui, LI Youqiang. Evaluation and practice of fine petroleum exploration in the Jiyang Depression [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 93-101.
- [26] 杨怀宇, 张鹏飞, 邱贻博, 等. 东营凹陷深层自源型油气成藏模式与勘探实践[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(2): 92-101.  
YANG Huaiyu, ZHANG Pengfei, QIU Yibo, et al. Deep self-source type hydrocarbon accumulation pattern and exploration practice in Dongying Sag [J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(2): 92-101.
- [27] 刘惠民, 高阳, 秦峰, 等. 渤海湾盆地济阳坳陷油气勘探新领域、新类型及资源潜力[J]. 石油学报, 2023, 44(12): 2 141-2 159.  
LIU Huimin, GAO Yang, QIN Feng, et al. New fields, new types and resource potentials of hydrocarbon exploration in Jiyang depression, Bohai Bay Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2 141-2 159.

编辑 邹澍滢