

# 东营凹陷泥页岩有利相带定量评价

段悦

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: 2024年2月19日; 录用日期: 2024年5月18日; 发布日期: 2024年5月31日

## 摘要

东营凹陷具有丰富的页岩油资源, 2019年以来, 东营凹陷多口页岩油井峰值日油超100 t/d, 展现了良好的勘探开发前景。综合运用岩心、薄片和分析测试等资料, 在前期对东营凹陷沙四上-沙三下亚段泥页岩沉积相、沉积亚相认识的基础上, 对东营凹陷泥页岩沉积相、沉积亚相的储集性、含油性、可动性和可压性评价, 建立了东营凹陷泥页岩沉积亚相定量评价公式, 对泥页岩沉积亚相有利相带进行排队, 依次是纹层状混源亚相、层状混源亚相、陆源层状灰质泥岩亚相、湖源碳酸盐亚相、陆源块状灰质泥岩亚相、湖源膏盐亚相。优选出东营凹陷泥页岩有利相带是纹层状混源亚相、层状混源亚相和陆源层状灰质泥岩亚相。首次对东营凹陷泥页岩有利相带进行评价, 对济阳坳陷和同等类型陆相断陷盆地页岩油勘探有一定指导意义。

## 关键词

泥页岩, 沉积相, 沉积亚相, 有利相带, 定量评价, 东营凹陷

# Quantitative Evaluation for Favorable Facies Zone of Shale in Dongying Depression

Yue Duan

Exploration and Development Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying Shandong

Received: Feb. 19<sup>th</sup>, 2024; accepted: May 18<sup>th</sup>, 2024; published: May 31<sup>st</sup>, 2024

## Abstract

Dongying Depression is rich in shale oil resources. Since 2019, the peak daily oil of many shale oil wells in Dongying Depression has exceeded 100 t/d, showing a good exploration and development prospect. Comprehensive use of core, thin slice and analysis test data, on the basis of the earlier stage understanding for shale sedimentary facies and subfacies of Es4u-Es3L of Dongying depression, by reservoir properties, oiliness, mobility and compressibility evaluation of the shale sedimentary facies and subfacies in Dongying depression, quantitative evaluation formula of shale sedimentary subfacies was established. By evaluating favorable phase zones of shale sedimentary subfacies, favorable

文章引用: 段悦. 东营凹陷泥页岩有利相带定量评价[J]. 地球科学前沿, 2024, 14(5): 610-617.

DOI: 10.12677/ag.2024.145057

phase zones are orderly laminated mixed source subfacies, layered mixed source subfacies, land source layered calcareous mudstone subfacies, lacustrine source carbonate subfacies, land source massive calcareous mudstone subfacies, and lacustrine source gypsum subfacies. The favorable facies zone of the shale in Dongying depression is the laminated mixed source subfacies, layered mixed source subfacies and land source layered calcareous mudstone subfacies. The evaluation of the favorable facies zone of shale in Dongying depression for the first time has certain guiding significance for the shale oil exploration in Jiyang depression and the same type of continental fault basin.

## Keywords

Shale, Sedimentary Facies, Sedimentary Subfacies, Favorable Facies Zone, Quantitative Evaluation, Dongying Depression

Copyright © 2024 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

东营凹陷页岩油发育于古近系富有机质烃源岩层系，油气赋存、富集于页岩微-纳米孔隙中，具有“厚度大、分布稳定、源储一体、连续聚集”的成藏特点，通过水平井组合缝网压裂能够获得商业产能，直斜井均可获工业油流。东营凹陷具有丰富的页岩油资源，具有良好的勘探开发前景[1] [2] [3]。但由于陆相页岩沉积相、岩相变化快，相变规律不清，页岩沉积相的形成主控因素及发育分布等尚处于探索阶段[4] [5]，严重制约了东营凹陷页岩油全方位勘探。

本文在前期泥页岩沉积相、沉积亚相划分的基础上，通过对泥页岩沉积亚相的储集性、含油性、可动性和可压性评价，对东营凹陷沙四上-沙三下亚段泥页岩沉积相、沉积亚相进行定量评价排队，优选有利相带，以期对东营凹陷页岩油勘探有指导作用。

## 2. 地质概况

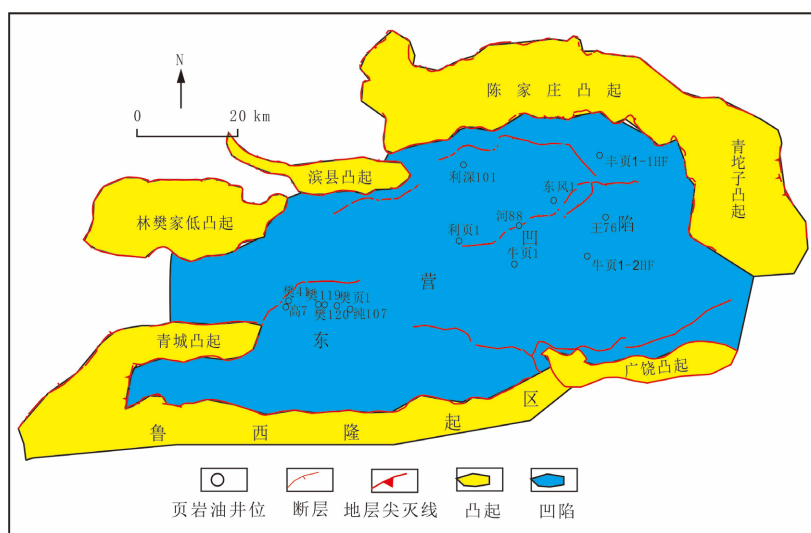


Figure 1. Location of Dongying depression

图 1. 东营凹陷区域位置图

东营凹陷位于济阳拗陷南部，北以陈家庄凸起为界，南为鲁西隆起，东为青坨子凸起，西为滨县、青城凸起，总面积约 5700 Km<sup>2</sup> (图 1)，凹陷内发育 4 个次级洼陷，是一个北断南超的箕状凹陷[6] [7] [8]。东营凹陷油气资源丰富，包括 11 套含油层系。东营凹陷的页岩油主层系为沙四上亚段、沙三下亚段，具有页岩沉积环境多变，页岩层系页岩岩相类型多样，叠置方式复杂，页岩分布广，有效厚度大，地质年代新，演化程度低，原油黏度高的特点[9] [10]。

### 3. 有利相带

前期研究表明，东营凹陷沙四上亚段 - 沙三下亚段泥页岩沉积相可划分为陆源相、混源相和湖源相，陆源相可划分为层状灰质泥岩亚相和块状灰质泥岩亚相，混源相可划分为纹层状混源亚相和层状混源亚相，湖源相划分为膏盐亚相和碳酸盐亚相[11]。

泥页岩沉积(亚)相不同，它的储集性、含油性、可动性和可压性不同(图 2)。通过对泥页岩沉积(亚)相的储集性、含油性、可动性和可压性分析，明确泥页岩有利沉积相带。

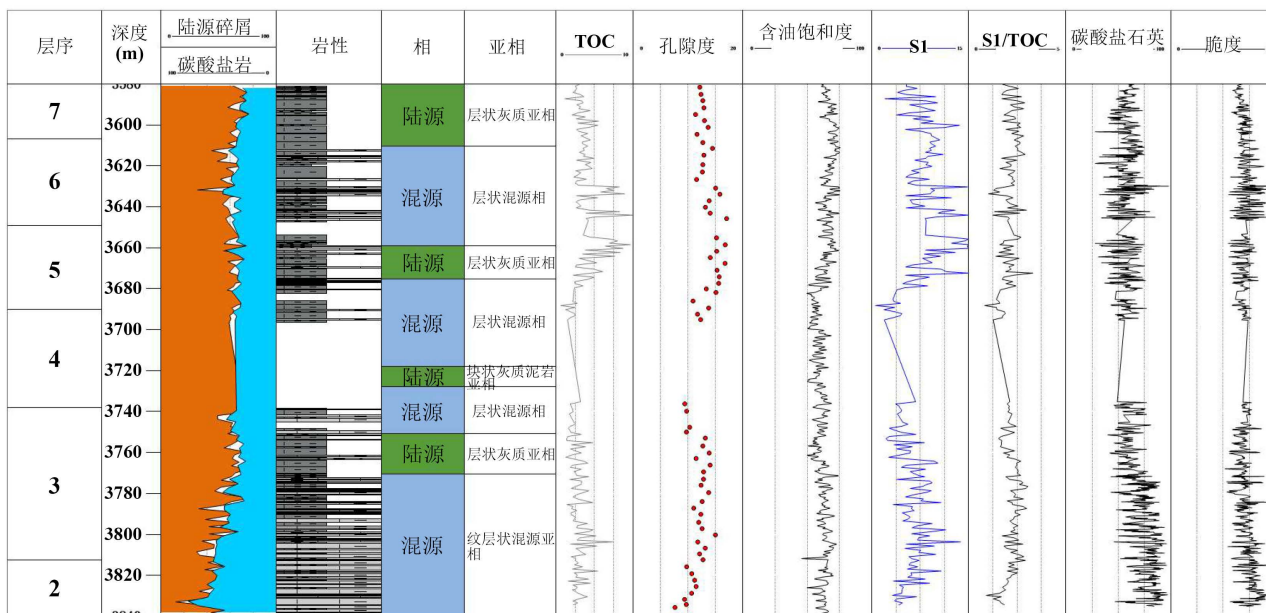


Figure 2. Sedimentary facies of well Liy1 in Dongying Depression

图 2. 东营凹陷利页 1 单井相

#### 3.1. 沉积(亚)相储集性

通过 4040 张薄片、916 块扫描电镜及氩离子剖光多方法观察，证实了泥页岩储集空间由孔隙和裂缝组成，以无机孔为主，无机孔占比可达 95%，孔隙较小，以纳米孔隙和少量微米孔隙为主[12]。

陆源块状灰质泥岩亚相的典型岩相以富有机质块状灰质泥岩为主，储集空间以泥质层裂缝为主，含泥质、黄铁矿、灰质晶间孔及长石颗粒溶蚀孔；陆源层状灰质泥岩亚相的典型岩相以富有机质层状灰质泥岩夹泥质灰岩相为主，储集空间以泥质层裂缝、泥质晶间孔为主，含黄铁矿、灰质晶间孔及长石颗粒溶蚀孔；纹层状混源相的典型岩相以富有机质纹层泥质灰岩与灰质泥岩互层为主，储集空间以泥质层裂缝、泥质晶间孔、灰质晶间孔为主，含黄铁矿、长石颗粒溶蚀孔；层状混源相的典型岩相以富有机质层状泥质灰岩为主，储集空间以泥质晶间孔、灰质晶间孔为主，含泥质层裂缝、黄铁矿、长石颗粒溶蚀孔；湖源碳酸盐亚相的典型岩相以含有有机质层状泥质灰岩、含有有机质层状泥质白云岩、富有机质水平微(泥)

晶纹层泥质灰岩为主，储集空间以碳酸盐晶间孔为主，含黄铁矿、灰质晶间孔；湖源膏盐亚相的典型岩相以含有有机质膏质泥岩和膏盐岩为主，储集空间以膏质晶间孔为主。

不同的泥页岩沉积相、亚相储集性不同。东营凹陷页岩油井岩心分析化验结果表明，纹层状混源亚相储集性最好，孔隙度平均值为 12.8%，其次为层状混源亚相，孔隙度平均值为 10.45%，湖源膏盐亚相最差，孔隙度平均值仅为 3.1% (图 3)。

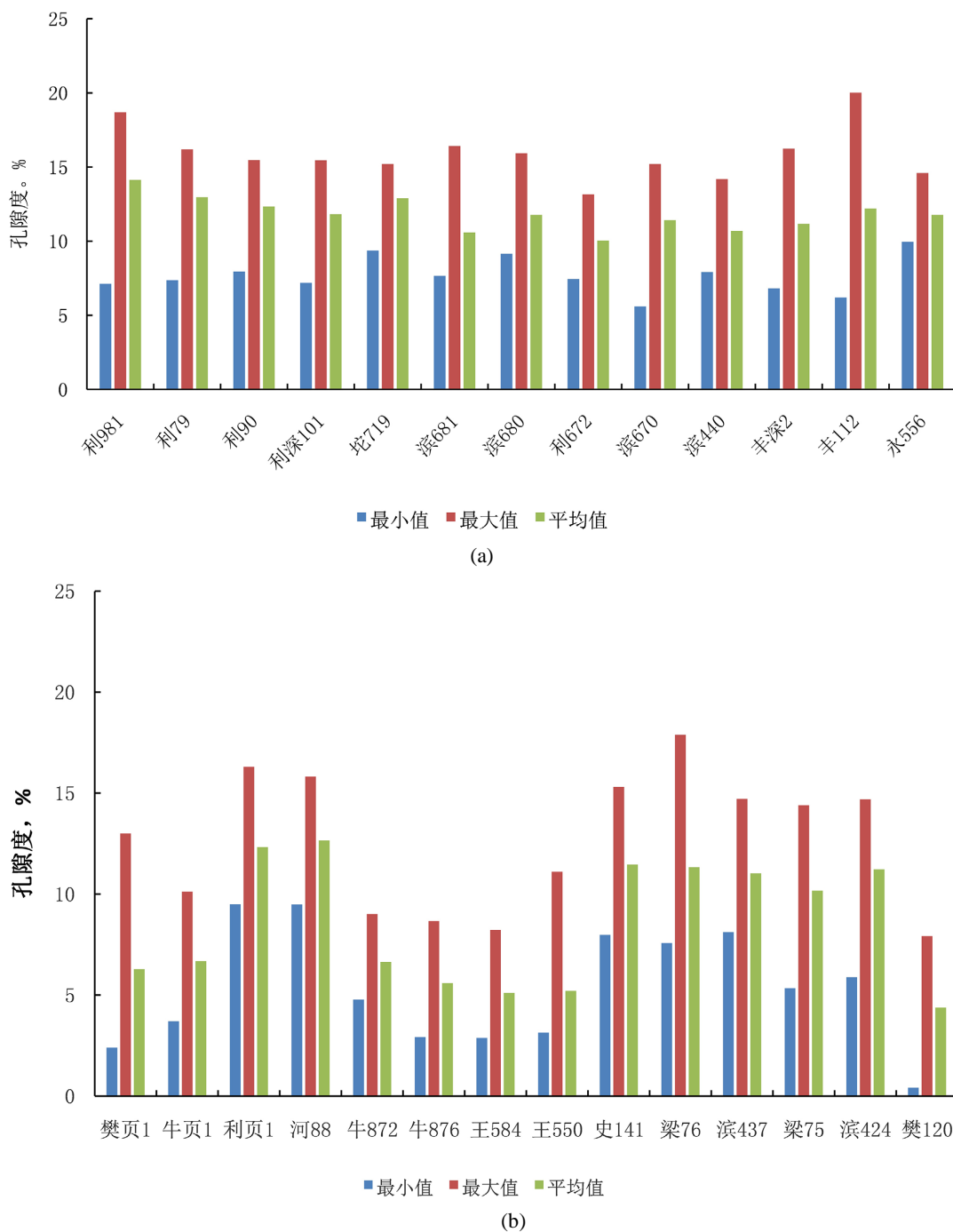


Figure 3. porosity of laminated mixed source subfacies, layered mixed source subfacies  
图 3. 纹层状混源亚相、层状混源相孔隙度

### 3.2. 沉积(亚)相含油性

不同泥页岩沉积亚相含油性不同。荧光薄片和含油饱和度可以看出,纹层状混源亚相含油性最好,荧光显示为绿色,呈层状,含油饱和度平均值为69.09%,其次为层状混源亚相,荧光显示为绿色,呈层状,含油饱和度平均值为67.63%,陆源层状灰质泥岩亚相荧光显示为绿色,呈分散状,含油饱和度平均值为67.03%,湖源膏盐亚相最差,含油饱和度平均值仅为35%(图4)。

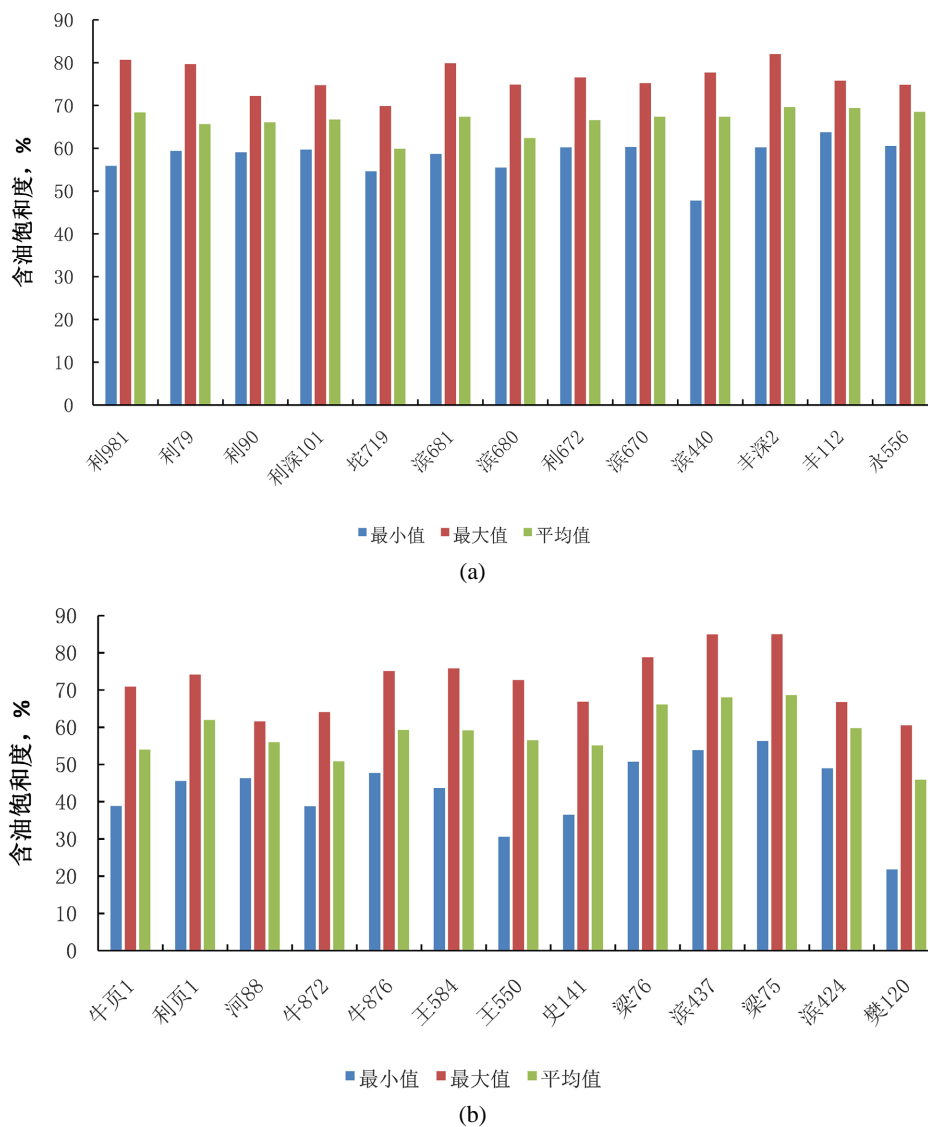
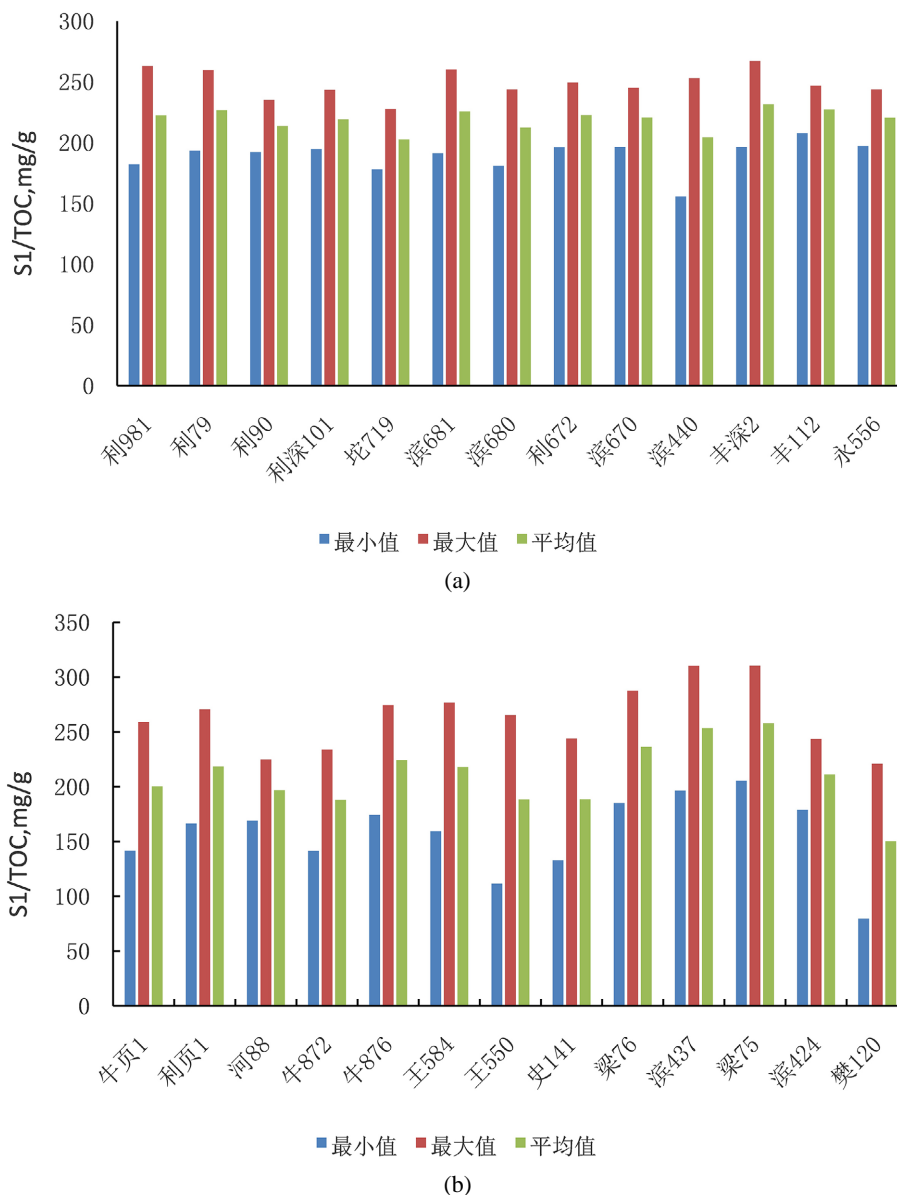


Figure 4. Oil saturation of laminated mixed source subfacies, layered mixed source subfacies

图4. 纹层状混源亚相、层状混源相含油饱和度

### 3.3. 沉积(亚)相可动性

由于页岩油流动性差,可动性是评价泥页岩沉积亚相的关键参数。可动性可由S1、S1/TOC和页岩油黏度表征,本次研究泥页岩沉积亚相可动性用S1/TOC表示。纹层状混源亚相可动性最好,平均值为218 mg/g,其次为陆源层状灰质泥岩亚相,平均值为214 mg/g,湖源膏盐亚相可动性最差,平均值为20 mg/g(图5)。



**Figure 5.** Mobility of laminated mixed source subfacies, layered mixed source subfacies  
**图 5.** 纹层状混源亚相、层状混源相可动性

### 3.4. 沉积(亚)相可压性

脆性矿物含量越高泥页岩可压性越好。泥页岩的可压性可由脆性矿物含量和脆度表征。针对济阳坳陷泥页岩富含碳酸盐的特征,本次研究以脆度((石英 + 碳酸盐)/(石英 + 碳酸盐 + 粘土矿物))代表泥页岩沉积(亚)相的可压性,值越高可压性越好[13]。纹层状混源亚相可压性最好,脆度平均值为 83%,其次为层状混源亚相,脆度平均值为 80%,湖源膏盐亚相可压性最差,脆度平均值为 36%。

### 4. 有利相带定量评价

通过统计不同泥页岩不同沉积(亚)相的储集性、含油性、可动性和可压性,对泥页岩有利相带进行评价。通过 SPSS 软件拟合,对泥页岩不同沉积(亚)相的储集性、含油性、可动性和可压性的权重进行赋分,

沉积(亚)相的储集性系数是 0.3, 沉积(亚)相的含油性系数是 0.3, 沉积(亚)相的可动性是 0.2, 沉积(亚)相的可压性是 0.2。为了对泥页岩相带进行评价, 建立了如下公式:

$$S_{FB} = a1*\Phi + a2*So + a3*M + a4*P \quad (1)$$

$S_{FB}$ : 泥页岩相带总分;  $a1$ : 泥页岩储集性权系数;  $\Phi$ : 泥页岩孔隙度;

$a2$ : 泥页岩含油性权系数;  $So$ : 含油饱和度;  $a3$ : 泥页岩可动性权系数;  $M$ : 页岩油可动性, 归一化处理;  $a4$ : 泥页岩可压性权系数;  $P$ : 泥页岩脆度。

通过公式可以计算出泥页岩相带的总分, 根据总分可以对泥页岩相带进行排队, 确定有利相带的顺序。计算结果表明, 纹层状混源亚相是最有利的相带, 其后依次是层状混源亚相、陆源层状灰质泥岩亚相、湖源碳酸盐亚相、陆源块状灰质泥岩亚相、湖源膏盐亚相(表 1)。目前, 东营凹陷页岩油产量较高的井, 如丰页 1-1HF 和牛页 1-2HF 井都分布在纹层状混源亚相和层状混源亚相内, 说明东营凹陷泥页岩有利相带评价结果是可信的。因此, 下一步页岩油勘探, 应该主要在纹层状混源亚相、层状混源亚相、陆源层状灰质泥岩亚相发育的区域部署井位, 寻找页岩油。

**Table 1.** shale sedimentary subfacies evaluation

**表 1.** 东营凹陷泥页岩沉积亚相评价表

沉积相	沉积亚相	孔隙度		含油饱和度		可动性		可压性		赋分	排序
		平均值, %	系数	平均值, %	系数	平均值, 归一化	系数	平均值, %	系数		
混源相	纹层状混源亚相	12.8	0.3	69.09	0.3	1	0.2	83	0.2	41.367	1
	层状混源亚相	10.45	0.3	67.63	0.3	0.96	0.2	80	0.2	39.616	2
陆源相	层状灰质泥岩亚相	12.29	0.3	67.03	0.3	0.98	0.2	78	0.2	39.592	3
湖源相	碳酸盐亚相	5.13	0.3	51.95	0.3	0.56	0.2	63	0.2	29.836	4
陆源相	块状灰质泥岩亚相	6.23	0.3	52.55	0.3	0.2	0.2	54	0.2	28.47	5
湖源相	膏盐亚相	3.1	0.3	35	0.3	0	0.2	36	0.2	18.63	6

## 5. 结论

1) 泥页岩沉积(亚)相不同, 它的储集性、含油性、可动性和可压性不同。分析测试结果表明, 东营凹陷泥页岩纹层状混源亚相储集性、含油性、可动性和可压性最好, 湖源膏盐亚相储集性、含油性、可动性和可压性最差。

2) 建立了东营凹陷泥页岩有利相带定量评价公式, 对泥页岩相带进行排序。纹层状混源亚相是最有利的相带, 其后依次是层状混源亚相、陆源层状灰质泥岩亚相、湖源碳酸盐亚相、陆源块状灰质泥岩亚相、湖源膏盐亚相。

首次对东营凹陷泥页岩沉积(亚)相进行定量评价, 纹层状混源亚相、层状混源亚相和陆源层状灰质泥岩亚相是下一步优先考虑的页岩油勘探目标, 对济阳拗陷和同等类型陆相断陷盆地页岩油勘探有一定指导意义。

## 基金项目

本文为国家专项《大型油气田及煤层气开发》子课题“济阳拗陷页岩油勘探开发目标评价”(2017ZX05049-004)的核心内容。

## 参考文献

[1] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 等. 中国陆相页岩油地质特征与勘探实践[J]. 地质学报, 2022, 96(1): 155-170.

- 
- [2] 杨勇. 济阳陆相断陷盆地页岩油富集高产规律[J]. 油气地质与采收率, 2023, 30(1): 1-20.
- [3] 刘惠民, 等. 济阳拗陷页岩油勘探实践与前景展望[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(1): 73-87.
- [4] 吴靖, 姜在兴, 潘悦文, 等. 湖相细粒沉积模式—以东营凹陷古近系沙河街组四段上亚段为例[J]. 石油学报, 2016, 37(9): 1080-1089.
- [5] 张顺, 陈世悦, 谭明友, 等. 东营凹陷西部沙河街组三段下亚段泥页岩沉积微相[J]. 石油学报, 2014, 35(4): 633-645.
- [6] 蒋有录, 谭丽娟, 荣启宏, 等. 东营凹陷博兴地区油气成藏动力学与成藏模式[J]. 地质科学, 2003, 38(3): 323-331.
- [7] 陈中红, 查明. 东营凹陷烃源岩排烃的地质地球化学特征[J]. 地球化学, 2005, 34(1): 79-87.
- [8] 吴靖. 东营凹陷古近系沙四上亚段细粒岩沉积特征与层序地层研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
- [9] 宁方兴, 王学军, 郝雪峰, 等. 济阳拗陷页岩油赋存状态和可动性分析[J]. 新疆石油天然气, 2015, 11(3): 1-5.
- [10] 宁方兴. 济阳拗陷页岩油富集主控因素[J]. 石油学报, 2015, 36(8): 905-914.
- [11] 段悦. 东营凹陷泥页岩沉积相分析[J]. 地球科学前沿, 2023, 13(4): 348-356.  
<https://doi.org/10.12677/AG.2023.134034>
- [12] 王民, 马睿, 李进步, 等. 济阳拗陷古近系沙河街组湖相页岩油赋存机理[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(4): 789-802.
- [13] 张宜. 页岩气储层脆性评价方法研究现状[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(4): 789-802.