车镇凹陷郭局子洼陷沙三下亚段页岩岩相类型 及特征

宋晓倩1, 巴素玉1, 刘升余1, 刘 鹏2, 师 涛1, 阎丽艳1, 时瑞坤1

1中石化胜利油田分公司物探研究院, 山东 东营

收稿日期: 2021年9月6日; 录用日期: 2021年10月19日; 发布日期: 2021年10月27日

摘要

郭局子挂陷沙三段页岩有机质丰度高、类型好,具有良好的页岩油气生烃潜力,但前人针对该区泥页岩的基本岩相特征研究较少。综合沉积学、岩相学理论,在岩心精细观察描述、薄片分析及测试资料分析基础上,重点考虑有机质含量、沉积构造和岩性等要素,对郭局子挂陷沙三下亚段重点层组(12~13层组)开展泥页岩岩相划分。结果表明: 1) 郭局子挂陷沙三下亚段12~13层组主要发育富有机质纹层状泥质灰岩夹灰条相、富有机质层状泥质灰岩夹灰条相、含有机质层状灰质泥岩夹砂条相、块状灰质泥岩相等多种岩相类型。2) 北部陡坡带主要为砂岩夹层发育区,南部缓坡带主要为碳酸盐岩夹层发育区,13s层组具有脆性矿物含量高、生烃指示好的特点,发育规模较大的富有机质纹层状-层状泥质灰岩夹灰条相,是最有利的油气勘探目标层系。3) 古物源、古水深(古地形)、古气候等因素控制了泥页岩的岩石成分、有机质含量及纹层分布。该研究成果明确了郭局子挂陷泥页岩优势岩相的分布规律,能够为下步该地区的区带评价和页岩油井位目标优选提供基础理论依据。

关键词

车镇凹陷,郭局子洼陷,泥页岩,岩相类型

Types and Characteristics of Shale Lithofacies in Guo Jvzi Subsag, Chezhen Sag

Xiaoqian Song¹, Suyu Ba¹, Shengyu Liu¹, Peng Liu², Tao Shi¹, Liyan Yan¹, Ruikun Shi¹

文章引用: 宋晓倩, 巴素玉, 刘升余, 刘鹏, 师涛, 阎丽艳, 时瑞坤. 车镇凹陷郭局子洼陷沙三下亚段页岩岩相类型及特征[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(10): 1341-1352. DOI: 10.12677/ag.2021.1110129

²中石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东 东营

¹Geophysical Research Institute of Sinopec Shengli Oilfield, Dongying Shandong

²Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Shengli Oilfield, Dongying Shandong

Received: Sep. 6th, 2021; accepted: Oct. 19th, 2021; published: Oct. 27th, 2021

Abstract

The abundance and type of organic matter in Es3 member of Guo jyzi subsag are high and have good hydrocarbon generation potential of shale oil and gas, but there are few previous studies on basic lithofacies characteristics of shale in this area. In this paper, based on the comprehensive theory of sedimentology and lithofacies, detailed description of the core, thin section analysis and analysis of test data, the shale lithofacies of key strata of the lower member of Es3 in Guo jvzi subsag were divided, with emphasis on organic matter content, sedimentary structure and lithology. The results show that: There are a variety of lithofacies types in the 12th and 13th formation of the lower member of Es3 in Guo jvzi subsag, including organic-rich lamellar marlaceous limestone with limeston thin interlayer facies, organic-rich layered marlaceous limestone with limeston thin interlayer facies, organic-rich lamellar mudstone with sand thin interlayer facies, and massive limestone mudstone. The northern steep slope zones are mainly sandstone interbedded zone, while south gentle slope belt are mainly rich in carbonate interlayer. The 13s layer has high brittleness mineral content, indicating good hydrocarbon generation characteristics, and develop organic-rich lamellar and layered marlaceous limestone with limeston thin interlayer facies, which is the most favorable oil and gas exploration target strata. The rock composition, organic matter content and laminae distribution of mud shale are controlled by the factors such as paleosource, paleodepth (paleotopography) and paleoclimate. The research results clarify the distribution law of dominant lithofacies in the shale of Guo jvzi subsag, which can provide the basic theoretical basis for the next step of zone evaluation and optimal selection of shale oil well target in this area.

Keywords

Chenzhen Sag, Guojvzi Subsag, Shale, Petrographic Characteristics

Copyright © 2021 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

页岩油已成为全球油气勘探开发的重要接替阵地[1] [2]。与北美海相沉积相比,中国陆相湖盆泥页岩具有类型多样、复杂多变、有序演化的特点[3]。平面上,济阳坳陷页岩油主要分布在东营、沾化凹陷,其次为车镇、惠民凹陷。前人针对济阳坳陷页岩油勘探主要集中在次级洼陷如渤南洼陷、博兴洼陷、牛庄洼陷和利津洼陷中,主要出油层段以沙三下亚段、沙四上亚段、沙一下亚段为主,多口井获得了较高的工业产能[4] [5]。对郭局子地区泥页岩勘探工作和基础研究工作还处于起步阶段,通过对济阳坳陷已钻探井进行复查,车镇坳陷郭局子地区具有泥页岩厚度大、油气产能高的特点,是未来页岩油勘探的潜力区。本文即以济阳坳陷郭局子地区沙三下亚段(主要是 12~13 层组)页岩为主要研究对象,结合前人页岩岩相划分方案,在综合岩心、测井、分析测试资料基础上,系统开展岩相类型划分,进一步明确不同岩相的发育特征,确定有利岩相发育区,能够为该区页岩油勘探指明方向,并为相似区块页岩油气勘探提

供借鉴。

2. 区域地质概况

郭局子洼陷位于济阳坳陷车镇凹陷的东部,北界为埕南断层,南部为义和庄凸起,西部以大王东断层和大古 60 潜山与为界,洼陷向东北逐渐抬升与埕东凸起相连,向东南通过义东断层北部鼻状构造过渡到渤南洼陷[6](见图 1)。整个车镇凹陷在古近纪继承了中生代的断陷发展,表现为北断南超的单断式断陷湖盆[7],而郭局子洼陷作为车镇凹陷中发育的大型次级洼陷之一,具有典型中国古新生代陆相断陷湖盆特征[8]。郭局子洼陷古近系沙河街组地层沉积厚度较大,自上而下可划分为沙一段(Es1)、沙二段(Es2)、沙三段(Es3)和沙四段(Es4),其中沙三段可进一步划分为沙三上亚段(Es $_3^*$)、沙三中亚段(Es $_3^*$)和沙三下亚段(Es $_3^*$),沙三下亚段包括 9~11、12s、12x、13s、13x 等层组,由该区近东西向地层对比剖面来看,12~13层组沉积时期地层厚度较大,向西地层抬升减薄,厚度沉积中心在 67、69 井附近,至 9~11 层组沉积时期地层沉积厚度明显减薄(见图 1)。

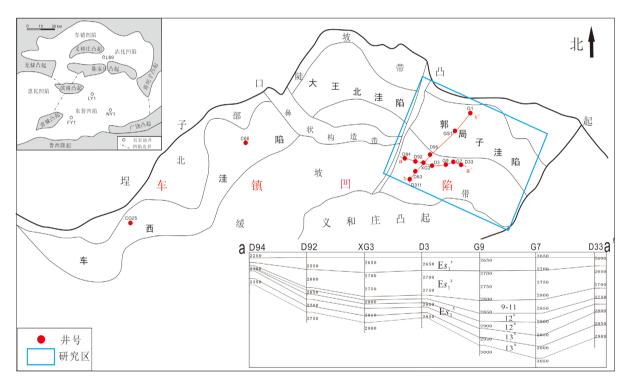


Figure 1. Structural location and stratigraphic distribution of Es3 in Guojvzi subsag (with modifications according to the literature [6])

图 1. 郭局子地区构造位置及沙三段地层展布特征(据文献[6],有改动)

由该区沙三段岩样分析数据得知,有机碳(TOC)含量高达 3%~10%,氯仿沥青 "A"含量为 0.2%~0.4%,转化率高达 8%~10%,总烃含量为 48%~64%,说明该区沙三段有机质的丰度高,类型好,转化率高,其中沙三下亚段 12~13 砂组有机碳(TOC)含量主要集中在 2%~10%, S1 含量在 0.5~5.2 mg/g, S1/TOC 一般超过 50 mg/g, 12~13 砂组的 S1/TOC 明显高于其他砂组(见图 2),此外,通过对研究区已钻井进行重新梳理得知,郭局子地区沙三下亚段 12~13 层组共有 27 口井钻遇良好的油气显示,包含有 6 口工业油流井,其中 XG3 井在 13 层组获得日油 35.6 t的工业油流,展现了郭局子地区页岩油较大的勘探潜力,本文则重点以沙三下亚段 12~13 层组为主要研究层段开展系统研究。

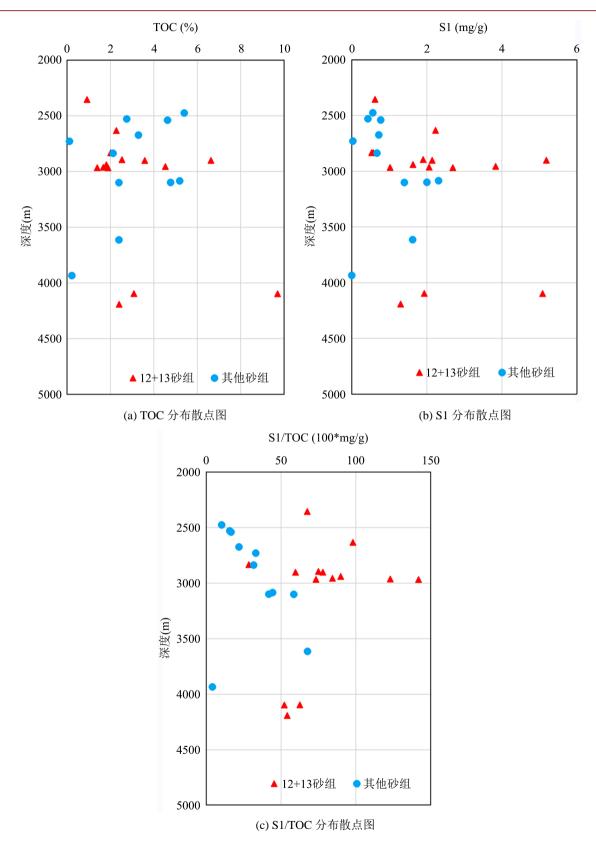


Figure 2. Scatter diagram of organic geochemistry parameters of lower member of Es3 in Guojvzi subsag 图 2. 郭局子地区沙三下亚段有机地化参数散点图

3. 主要岩相类型及特征

陆相页岩岩相类型多样,目前主要依据矿物成分、沉积构造、有机质丰度等对岩相进行划分[9] [10] [11]。参照前人划分方案,通过岩心精细描述、薄片分析、测井资料综合分析,并结合研究区沉积构造背景和地化测试数据等,重点考虑有机质含量、沉积构造和岩性等要素,选取郭局子洼陷内典型的页岩井如 G1、G9、D92、D93 井进行岩相识别和划分,在研究区共识别出 4 种典型岩相类型,分别为富有机质纹层状泥质灰岩夹灰条相、富有机质层状泥质灰岩夹灰条相、含有机质层状灰质泥岩夹砂条相、块状灰质泥岩相等类型。不同岩相类型在空间发育位置、矿物组分及沉积特征、测井特征等存在差异,具体情况如下。

3.1. 富有机质纹层状泥质灰岩夹灰条相

该类岩相岩心颜色表现为浅灰-深灰色,发育水平、连续的纹层状结构(见图 3),岩石成分以泥质灰岩为主,发育单层厚度在 0.5~3 m 的灰质夹层,岩心可见生物碎片。分析测试表明,矿物组成中灰质组分比重最大,平均含量 74.2%,最高可达 82%,TOC 含量整体最高,一般大于 3.0%,S1 值在 2.0 mg/g 左右(见表 1),反映有机质含量较高的特点,其中 G9 井在 2904 m 处镜质体反射率在 0.5~0.68%,均值为 0.57%,反映了有机质已经进入中等演化阶段。有机质含量高,且碳酸盐矿物与黏土矿物纹层多成层偶产出、富集,表明该岩相沉积时主要处于远离陆源供应、气候相对干旱的咸水环境,主要以化学沉积为主,沉积时水动力相对低能、为半封闭—封闭的沉积环境[9][10][11]。

镜下观察可见明显的纹层结构,纹层主要呈现连续层状,也可见波状起伏或透镜状结构,岩石主要成分为方解石和泥质,方解石以细晶结构为主,其分布状态表现为马牙状垂直层理生长,部分方解石呈现泥晶结构,其与泥质呈互层展布,在灰质层中可见有机质充填(见图 3),此外,镜下偶见粉砂、黄铁矿和胶磷矿。

该类岩相具有良好的储集性和含油性,自然伽马曲线表现为中低值特征,三孔隙度曲线表现为高声波时差、高中子、低密度特征,电阻率为高值。由于该类岩相裂缝较为发育,储层渗透性较好,自然电位曲线多呈现明显的负异常特征[12],如 G9 井 12x、13s 层组顶部属于该类岩相(见图 4)。

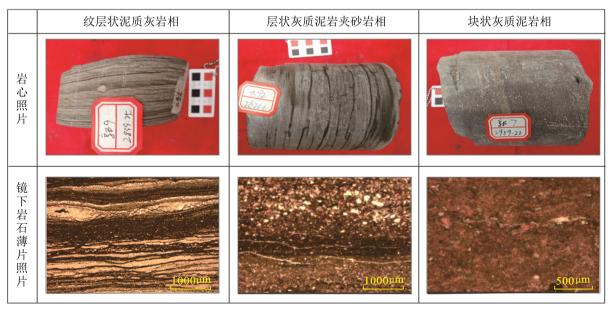


Figure 3. Shale core and microscopic photograph **图 3.** 泥页岩岩心及镜下照片

序号	岩相类型	岩石矿物组分 w _B /%			岩石热解参数	
		长英质矿物 w _B /%	碳酸盐矿物 w _B /%	黏土矿物 w _B /%	$S_1 \text{ (mg/g)}$	<i>TOC</i> (%)
1	富有机质纹层状泥质灰岩夹灰条相	13.4	74.2	12.4	2.1	3.6
2	富有机质层状泥质灰岩夹灰条相	14.6	66.7	18.8	2.2	2.3
3	含有机质层状灰质泥岩夹砂条相	47.5	24.2	28.3	1.0	1.4
4	块状灰质泥岩相	23.4	34.5	42.1	0.8	1.1

Table 1. Comparison table of rock pyrolysis parameters of different facies types 表 1. 不同岩相类型矿物组分及岩石热解参数对比表

该类岩相方解石含量高、岩石脆性较好,利于生成裂缝并与孔隙沟通形成有效的储集体[13],分析认为该岩相为郭局子洼陷最有利的含油气岩相类型,钻探结果也证实了这一观点,其中 XG3、D93 等多口井均在富有机质纹层状泥质灰岩夹灰条岩相带获得高产,该类岩相平面主要分布在洼陷中南部,靠近义和庄凸起缓坡带一侧。

3.2. 富有机质层状泥质灰岩夹灰条相

该类岩相与富有机质纹层状泥质灰岩夹灰条相类似,岩心颜色主要为浅灰-深灰色,但未见明显的水平纹层,矿物组分中灰质成分比重远大于长英质比重,TOC含量较纹层状泥质灰岩相有所减小,一般不足3.0%(见表1)。

镜下薄片可见层理发育,但层状界限不及纹层状岩相清晰,同时见有机质条带发育,岩石主要成分 为方解石和泥质,泥质、方解石常呈互层状分布。方解石以隐晶结构为主,含有少量黄铁矿和泥晶白云 石,同时见介形虫及其碎片,介形虫呈现顺层展布的特点,具有一定的定向性,镜下偶见胶磷矿。

与富有机质纹层状泥质灰岩夹灰条相相比,该类岩相的储集性、含油性有所降低,自然伽马曲线及三孔隙度曲线(声波时差、中子、密度)均表现为中等幅度、自然电位曲线表现为中等幅度异常。该岩相平面上主要靠近南部义和庄凸起的缓坡带,其沉积时湖水深度相对较浅[14],如 G9 井 13s 层组底部属于该类岩相(图 4)。

3.3. 含有机质层状灰质泥岩夹砂条相

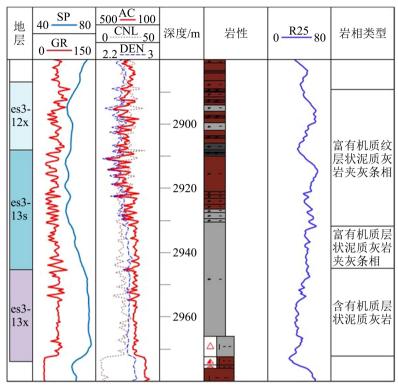
岩心及录井资料表明,该类岩相岩性以浅灰色灰质泥岩为主,发育层状构造(见图 3),矿物组分中长英质含量明显增加,大套泥页岩中可见砂质夹层发育,如位于洼陷北部的 G1 井发育多套 0.5 m~2.5 m 的粉砂岩、粉-细砂岩薄夹层,TOC 含量较富有机质岩相明显减小,一般不足 2.0% (见表 1)。

镜下薄片鉴定表明,岩石碎屑主要包括粗粉砂、细砂,含部分中砂和极细砂。粉砂成分包括石英、长石和岩屑等。岩屑成分主要为中酸性喷出岩岩屑、灰岩岩屑、白云岩岩屑、泥质岩屑等。填隙物主要为泥质、方解石,少量铁白云石,偶见黄铁矿、菱铁矿和次生石英。方解石以泥晶结构为主,少量粗粉晶结构;泥质为鳞片结构,局部被有机质侵染,结构不清,镜下偶见有机质条带、炭屑、介形虫碎片,部分有机质与泥质混杂。

该岩相较前两者岩相含油性及储集性更低,在测井上表现为"一高两中三低"的特点,即高密度,中自然伽马值,中等电阻率、低声波、低中子和低自然电位异常幅度。

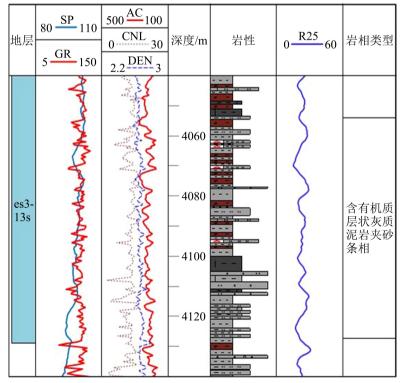
该岩相主要是半咸水、还原环境下,受机械搬运沉积与化学沉积共同作用形成的产物[15]。在水体相对较动荡的近物源区,随着陆源物质增多,易形成砂质夹层,位于工区北部陡坡带的 G1 井 13s 层组属于该岩相类型(见图 4)。

G9井岩相划分图

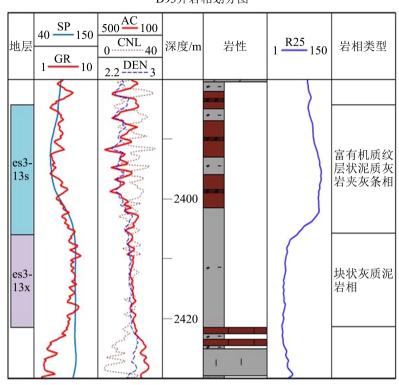


(a) G9 井岩相划分图

G1井岩相划分图



(b) G1 井岩相划分图



D93井岩相划分图

(c) D93 并岩相划分图

Figure 4. Lithofacies division map of typical well 图 4. 典型并岩相划分图

3.4. 块状灰质泥岩相

岩心观察表明,该类岩相岩性以灰色灰质泥岩、泥岩为主,一般不发育纹层,泥页岩多表现为块状结构(见图 3),岩石致密、脆性较差、层间孔隙也不发育,从而导致该类岩相储集性、含油性较差。镜下薄片显示,岩石表现为黏土结构,岩石成分主要为泥质和泥晶方解石,少量粉砂,偶见黄铁矿、胶磷矿和有机质条带。该岩相在测井上表现为"一高一中三低"的特点,即高自然伽马值、中等密度、低声波、低中子和低电阻率。块状灰质泥岩相主要发育在深湖区,是水体相对稳定环境下的沉积产物,如该区 D93 井 13x 层组属于该类岩相(见图 4)。

除上述典型岩相类型外,研究区还发育富有机质纹层状灰质泥岩夹砂条相、富有机质层状灰质泥岩夹砂条相、含有机质层状泥质灰岩相等岩相类型,不同岩相类型在有机质含量及纹层发育程度方面存在 差异。

4. 岩相分布特征

在对郭局子洼陷 30 多口井进行单井岩相划分、连井地层对比的基础上,明确了页岩岩相在纵向及平面的展布规律。

13x 层组发育时期,地层沉积厚度由北向南逐渐减薄(如图 5 所示),至 D311 井,地层向上逐渐超覆导致 13x 层组地层缺失,自北部陡坡带至南部缓坡带依次发育含有机质层状灰质泥岩夹砂条、含有机质层状灰质泥岩、含有机质层状泥质灰岩相。该沉积时期,南部缓坡带灰质夹层发育规模不大,北部陡坡带受物源供给影响,砂质夹层广泛发育。

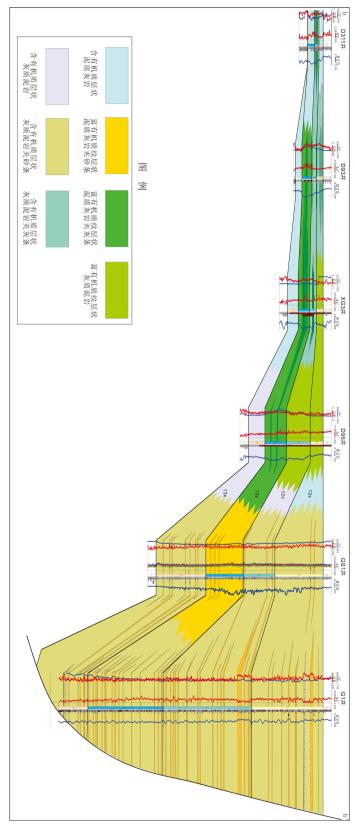


Figure 5. Lithofacies profile of well D311-XG3-G1 图 5. 过 D311-XG3-G1 井岩相剖面图

至 13s 层组发育时期,自陡坡区向缓坡区,依次发育含有机质层状灰质泥岩夹砂条相、富有机质层状-纹层状灰质泥岩夹砂条相、富有机质纹层状-层状泥质灰岩夹灰条相、含有机质层状泥质灰岩相等岩相类型。在洼陷的不同构造位置,泥页岩岩石成分类型存在差异,在洼陷内部,距离陡坡带,靠近物源处长英质矿物含量增多,含量一般在 30%~50%,而靠近缓坡带地势平坦、远离物源,灰质含量增多,在南部 XG3 井附近灰质含量最高,超过 50%。郭局子洼陷北部陡坡带主要为砂岩夹层发育区,厚度中心位于 G1 井,夹层累计厚度可达 40 m,而南部缓坡带砂岩夹层厚度较小,仅为几米;南部缓坡带主要为碳酸盐岩夹层发育区,厚度中心位于 XG3 附近,GS7 井零星分布。该层组整体具有脆性矿物含量高、生烃指示好的特点,富有机质纹层状-层状泥质灰岩夹灰条相在南部缓坡带发育规模较大,是最有利的油气勘探目标层系。

研究区至 12s、12x 层组沉积时期,湖盆面积逐渐扩大,脆性矿物含量较 13 层组沉积时期减少,以含有机质岩相为主,灰质夹层和砂质夹层平面发育位置与 13 层组沉积时期具有相似性,但发育规模有所减小。

平面上,以 13s 层组为例,受沉积相带控制,泥页岩岩相类型及其分布、不同岩相类型的生烃潜力也依次呈现规律性变化。郭局子洼陷沙三下沉积时期气候潮湿,水体盐度偏高,由近岸至洼陷内部依次发育滨湖、浅湖、半深湖、深湖等沉积微相类型,靠近北部陡坡带发育近岸扇。平面上,不同岩相类型呈带状分布,由盆地的几何中心靠缓坡一侧地势平缓、水浅,易形成纹层状灰质泥岩优质岩相发育区,在 D93、XG3、D95 井附近广泛发育富有机质纹层状泥质灰岩相(见图 6)。整体呈现由洼陷中心向南部斜坡纹层状结构向层状结构过渡、有机质含量也逐渐减少的特点。

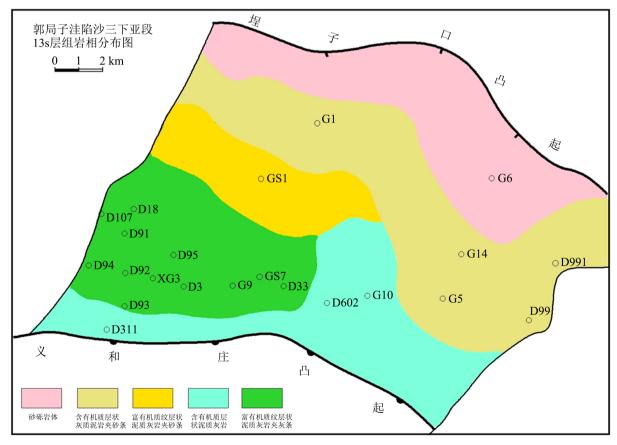


Figure 6. The petrographic zoning map of 13s formation in Es3 submember of Guojvzi subsag 图 6. 郭局子洼陷沙三下亚段 13s 层组岩相分区图

5. 页岩的沉积主控因素

陆相湖盆泥页岩具有沉积类型多样、展布特征复杂的特点,反映了泥页岩沉积的控制因素的复杂性 [16]。郭局子洼陷沉积时期,受古物源、古水深(古地形)、古气候等因素影响,湖盆内不同位置发育的泥页岩在岩石成分、有机质含量及纹层分布等存在差异,主要表现在:

- 1) 古物源、古水深(古地形)控制了不同矿物的分布位置,其中碳酸盐矿物主要集中在南部缓坡带的半深湖地带,长英质矿物主要分布在靠近北部物源供给充分的陡坡带及其前缘,而粘土矿物主要分布在深洼区。靠近陡坡带,强动力水流携带陆源粗碎屑沿着沟谷注入湖盆,随着水体能量减弱,最终以机械作用的形式沉降下来,在近陡坡带易发育大量砂质夹层。而靠近南部缓坡带,水体蒸发作用较强,水体中 ${
 m CO}_3^{2-}$ 和 ${
 m Ca}^{2+}$ 浓度较高,利于形成碳酸盐沉积,该区带灰质夹层较为发育。至深湖区,水体能量继续减弱,大量的粘土物质呈絮凝状沉降下来,并在深洼陷地带聚集,形成块状泥页岩。
- 2) 古气候的变化决定了有机质的生产力[17] [18]。受古气候影响,整个车镇凹陷在沙三下 13s 沉积时期,气候湿润,降雨量增加,一方面,利于河流携带营养物质进入湖泊,使得生物大量发育,同时该时期水体比较干净,一定程度上也提高了湖水的生产力,另一方面,大量雨水的注入导致湖平面迅速上升,湖水出现盐度分层,在湖水底部由于水体氧浓度低且水体盐浓度高,整体处于还原环境,有利于有机质保存、TOC 含量增加[14]。
- 3) 受古物源控制, 纹层主要分布在咸水-微咸水环境下相对较深的半深湖区,近源区及深湖区纹层基本不发育。由碳酸盐纹层和粘土层交替出现形成的纹层是沉积物周期性变化形成的产物,在湖盆近物源区,由于物源供给影响,长英质含量普遍较高,不利于碳酸盐岩纹层的发育,而深湖区粘土矿物含量较高、灰质含量偏低,且深湖区水体相对稳定,水体盐度受气候变化影响较小,也不利于纹层发育。

6. 结论

- 1) 研究区 12~13 层组发育 4 种典型岩相类型,分别为富有机质纹层状泥质灰岩夹灰条相、富有机质层状泥质灰岩夹灰条相、含有机质层状灰质泥岩夹砂条相、块状灰质泥岩相等类型。
- 2) 在洼陷的不同构造位置,泥页岩岩石成分类型存在差异,北部陡坡带主要为砂岩夹层发育区,南部缓坡带主要为碳酸盐岩夹层发育区,13s层组具有脆性矿物含量高、生烃指示好的特点,发育规模较大的富有机质纹层状-层状泥质灰岩夹灰条相,是最有利的油气勘探目标层系。
- 3) 研究区受古物源、古水深(古地形)、古气候等因素影响,湖盆内不同位置发育的泥页岩在岩石成分、有机质含量及纹层分布等存在明显差异。

参考文献

- [1] 邹才能,陶士振,杨智,等.中国非常规油气勘探与研究新进展[J].矿物岩石地球化学通报,2012,31(4):312-322.
- [2] 宋明水. 济阳坳陷页岩油勘探实践与现状[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(1): 1-12.
- [3] 朱德顺. 渤海湾盆地东营凹陷和沾化凹陷页岩油富集规律[J]. 新疆石油地质, 2016, 37(3): 270-274.
- [4] 宁方兴, 王学军, 郝雪峰, 等. 济阳坳陷页岩油甜点评价方法研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(35): 11-16.
- [5] 王延章, 刘雅利, 朱永峰, 等. 车镇凹陷郭局子洼陷北部陡坡带砂砾岩沉积序列[J]. 新疆石油地质, 2017, 38(6). 631-636
- [6] 张元福、姜在兴、郭局子洼陷湖缘峡谷及其对洼陷储集砂体的贡献[J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(1): 50-52.
- [7] 杨明岭,郭局子洼陷构造变形过程及其对沉积作用控制[D]:[博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [8] 冯红霞,吕增伟,李绍霞,等. 纯化油田沙四段上亚段自然电位曲线异常影响因素[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(5): 54-56.

- [9] 姜在兴, 张文昭, 梁超, 等. 页岩油气储层基本特征及评价要素[J]. 石油学报, 2014, 35(1): 184-196.
- [10] 姜在兴, 梁超, 吴靖, 等. 含油气细粒沉积岩研究的几个问题[J]. 石油学报, 2014, 34(6): 1031-1039.
- [11] 陈世悦, 张顺, 王永诗, 等. 渤海湾盆地东营凹陷古近系细粒沉积岩岩相类型及储集层特征[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(2): 129-136.
- [12] 王永诗, 巩建强, 房建军, 等. 渤南洼陷页岩油气富集高产条件及勘探方向[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(6): 10-14+115.
- [13] 马义权, 杜学斌, 刘惠民, 等. 东营凹陷沙四上亚段陆相页岩岩相特征, 成因及演化[J]. 地球科学. 2017, 42(7): 1195-1208.
- [14] 王勇, 王学军, 宋国奇, 等. 渤海湾盆地济阳坳陷泥页岩岩相与页岩油富集关系[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(5): 696-704.
- [15] 张顺, 陈世悦, 崔世凌, 等. 半深湖-深湖细粒沉积岩岩相类型及特征[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(5): 9-17.
- [16] 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.
- [17] 金成志,董万百,白云风,等. 松辽盆地古龙页岩岩相特征与成因[J]. 大庆石油地质与开发,2020,39(3): 35-44.
- [18] 丁江辉, 张金川, 石刚, 等. 宣城地区龙潭组页岩沉积环境与有机质富集[J]. 沉积学报, 2020, 39(2): 324-340.