

东营凹陷沙三下一沙四上亚段泥页岩岩相 沉积环境分析

杨万芹^{1,2}, 蒋有录¹, 王 勇²

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580;

2. 中国石化股份胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东东营 257015)

摘要:根据岩心及其分析化验资料,从岩石的颜色、成分、结构、有机质丰度等方面划分泥页岩岩相类型;从古气候、古物源、古水深、古盐度和古水体的氧化还原性5个方面分析古环境,建立环境指标分级量化标准。研究表明,东营凹陷沙四上亚段—沙三下亚段沉积环境特征具有气候由干燥—半干燥—半潮湿,水体由半深水到深水、从强还原性逐渐到还原性、盐度从盐水到咸水到半咸水,物源从较少到较多的规律变化,共划分了6个环境组合;并建立了沉积环境与泥页岩岩相之间的关系,即有机质丰度主要受盐度控制,盐水区为含有机质的岩相,咸水区和半咸水区为富有机质的岩相;结构主要受气候和水深控制,气候干燥—半干燥、半深水环境发育纹层状的岩相,气候半潮湿、深水环境发育层状的岩相;岩性主要受气候和物源控制,气候干燥、物源少的环境发育泥质灰(云)岩和灰(云)岩的岩相,气候半潮湿、物源较多的环境发育灰质泥岩的岩相。

关键词:东营凹陷;泥页岩岩相;沉积环境;古气候

中图分类号:TE 121.3 **文献标志码:**A

引用格式:杨万芹,蒋有录,王勇. 东营凹陷沙三下一沙四上亚段泥页岩岩相沉积环境分析[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2015,39(4):19-26.

YANG Wanqin, JIANG Youlu, WANG Yong. Study on shale facies sedimentary environment of lower Es₃-upper Es₄ in Dongying sag [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015,39(4):19-26.

Study on shale facies sedimentary environment of lower Es₃-upper Es₄ in Dongying sag

YANG Wanqin^{1,2}, JIANG Youlu¹, WANG Yong²

(1. School of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. Geoscience Research Institute, SINOPEC Shengli Oilfield, Dongying 257015, China)

Abstract: According to the core color, component, structure organic matter abundance of system cored wells, shale facies of the lower Es₃-upper Es₄ in Dongying sag were divided. The ancient environment was analyzed by climate, provenance, water depth, salinity, oxidation and reduction, and a standard of classification and quantification was established. The findings include: climate from arid to semiarid to semi-humid, water from semi-deep to deep and strong reduction to reduction, salinity from saline to salt to brackish, and provenance from less to more. The ancient environment can be divided into six environmental combinations. This study establishes the following relationships between the sedimentary environment and facies. The organic matter content of shale facies are mainly affected by salinity: saline range develops less organic matter facies, and salt and brackish range develops rich organic matter facies. Structure of shale facies are mainly controlled by climate and water depth: arid and semiarid climate and semi-deep water environment develops lamina facies, and semi-humid climate and deep water develops stratiform facies. Lithology of shale facies are mainly affected by climate and provenance: arid climate and less provenance environment develops argillaceous limestone and limestone, and demi-humid climate and more provenance

收稿日期:2014-12-05

基金项目:国家“973”计划项目(2014CB239104)

作者简介:杨万芹(1974-),女,高级工程师,博士研究生,研究方向为泥页岩油气地质。E-mail: yangwanqin. slyt@ sinopec. com。

environment develops lime mudstone.

Keywords: Dongying sag; shale facies; sedimentary environment; climate

近年来,页岩油气在北美特别是美国成功地勘探和开发,引起了广泛的关注,页岩油气资源也正在成为中国油气勘探的重要对象之一,是勘探的重要领域和后备阵地。国内外学者从泥页岩岩石学特征、储集特征、沉积环境和页岩油气形成机制和富集条件等方面进行了深入的研究^[1-6],但是对泥页岩岩相方面的相关研究比较少。岩相的划分是储层评价的基础,对储层预测至关重要。笔者立足东营凹陷沙三下—沙四上亚段页岩油气勘探实践,在大量岩心和分析化验资料基础上,对泥页岩岩相进行划分,对沉积环境指标量化分级,建立泥页岩岩相与沉积环境指标之间的关系,以期能从沉积环境角度预测泥页岩岩相的分布,为指导页岩油气勘探提供地质依据。

1 泥页岩岩相划分

岩相是一定沉积环境中形成的岩石或岩石组合,是沉积相的主要组成部分^[7]。岩相主要研究岩石的矿物成分、化学成分、结构、产状及分类、命名,以及了解岩石的成因、各种岩石间的相互关系及其演变等。根据岩相的定义及内涵,本文中泥页岩岩相类型的划分主要依据岩石颜色、成分、结构和有机碳含量等特征^[8-9]。

1.1 颜色

碎屑岩的颜色是碎屑岩最醒目的标志,是鉴别岩石、划分和对比地层、分析判断古地理的重要依据之一。从泥页岩岩心来看,最明显的是岩心颜色深浅的变化,从灰白色到灰色到深灰色再到灰黑色,成

分上灰质含量逐渐减少,反映水体逐渐变深,代表了从浅湖到半深湖到深湖的变化。泥页岩的颜色在岩相类型划分中主要用来判断大体的沉积环境。

1.2 成分

研究区泥页岩的主要成分为黏土矿物、碳酸盐(方解石、白云石和菱铁矿)矿物和石英、长石等砂级碎屑,因此依据成分以泥岩、灰(云)岩和砂岩作为三端元划分岩相,重点考虑泥岩、泥岩和灰岩之间的过渡岩性及泥岩和砂岩之间的过渡岩性,主要有泥岩、灰质泥岩、泥质灰岩和砂质泥岩等类型。

1.3 构造

依据岩石构造进行岩相划分,划分为纹层状、层状和块状。其中层状构造单层厚度一般大于1 mm,纹层层厚一般小于1 mm,且相邻层成分差异大,往往“明暗相间”。

1.4 有机质丰度

有机质是烃源岩的重要表征组分,其类型、含量及赋存状态是页岩油气评价的重要依据。勘探实践表明,有机碳大于2%为资源富集区,因此依据有机质丰度进行岩相划分,以有机碳含量2%为界,划分为富有机质(有机碳含量大于2%)和含有机质(有机碳含量小于2%)。

综合考虑,可以把泥页岩划分多种岩相类型,命名为有机质丰度+结构+成分+相,如富有机质纹层状泥岩相,含有机质层状灰质泥岩相等(泥页岩中包含的页岩,未在命名中出现,主要体现在结构中)。划分方案见表1。

表1 泥页岩岩相类型综合划分方案

Table 1 Comprehensive division of shale facies types

划分依据	岩相类型			备注
颜色	浅湖	半深湖	深湖	用于判断大的沉积环境,不参与岩相命名
成分	泥岩	灰质泥岩	泥质灰岩	砂质泥岩 参与岩相命名,排序3
构造	纹层状	层状	块状	参与岩相命名,排序2
有机质丰度	富有机质	含有机质		参与岩相命名,排序1

2 沉积环境指标的建立

目前,沉积环境的恢复方法较多,主要有地球化学法、沉积矿物学法、古生态学法、沉积动力学法和地震地层学法等。每种方法各有利弊,在实际应用中,根据地区资料情况和方法可操作性来选择沉积

环境的恢复方法。本文中主要应用地球化学法,即元素地球化学与有机地球化学相结合,从古气候、古物源、古水深、古盐度和古水体的氧化还原性等5个方面来分析古环境。东营凹陷泥页岩取心井主要有樊页1、利页1、牛页1和牛38等井,本文中资料主要来源于对这几口井的综合分析。

2.1 古气候

指示古气候的地球化学元素指标较多,如一般干旱的气候条件有利于 Ca、Mg、Na、K、Sr 及 Ba 等富集,Fe、Mn、Cr、V、Co、Ni 等元素趋向于湿润气候下富集等;Sr/Mg 比值降低,指示温度升高,反之指示温度降低;Mg/Ca、Sr/Ca 的值升高,对应古温度降低;Ba/Sr 比值大对应较暖湿的气候,反之对应较干冷气候^[10-12]。元素的迁移富集规律由元素本身的物理化学性质决定,同时受地质环境的影响,因此单一的元素或两个元素比值有可能不能准确地反映当时沉积的环境,而多个元素一起使用,在一定程度上可以消除这种影响。根据元素与气候干旱或湿润的对应关系,引入古气候指数的概念,对古气候变化给出定量的分析^[13]。

$$C = \frac{\sum (Fe+Mn+Cr+V+Co+Ni)}{\sum (Ca+Mg+Sr+Ba+K+Na)}$$

式中,C 为古气候指数。C 值越大,气候越潮湿温暖,反之则越干旱寒冷。

很多学者对济阳坳陷的古气候做过研究,李守军等^[14]根据孢粉资料恢复了济阳坳陷古近纪的气候,即沙四上—沙三下亚段时期,气候经历了从偏干旱温冷—干旱温凉—湿润温热的变化。据对东营凹陷几口泥页岩系统取心井的古气候指数的计算,其值在 0.0~0.6 之间,沙四上—沙三下亚段的变化趋势与前人研究结果一致。根据气候指数的大小与气候变化的对应关系,本文中对古气候指数进行了分级,小于 0.1 为干燥型气候,0.1~0.2 为半干燥型气候,0.2~0.4 为半潮湿型气候,大于 0.4 为潮湿型气候。根据古气候指数显示,东营凹陷沙四上—沙三下亚段时期古气候基本上为干燥—半干燥—半潮湿(图 1)。

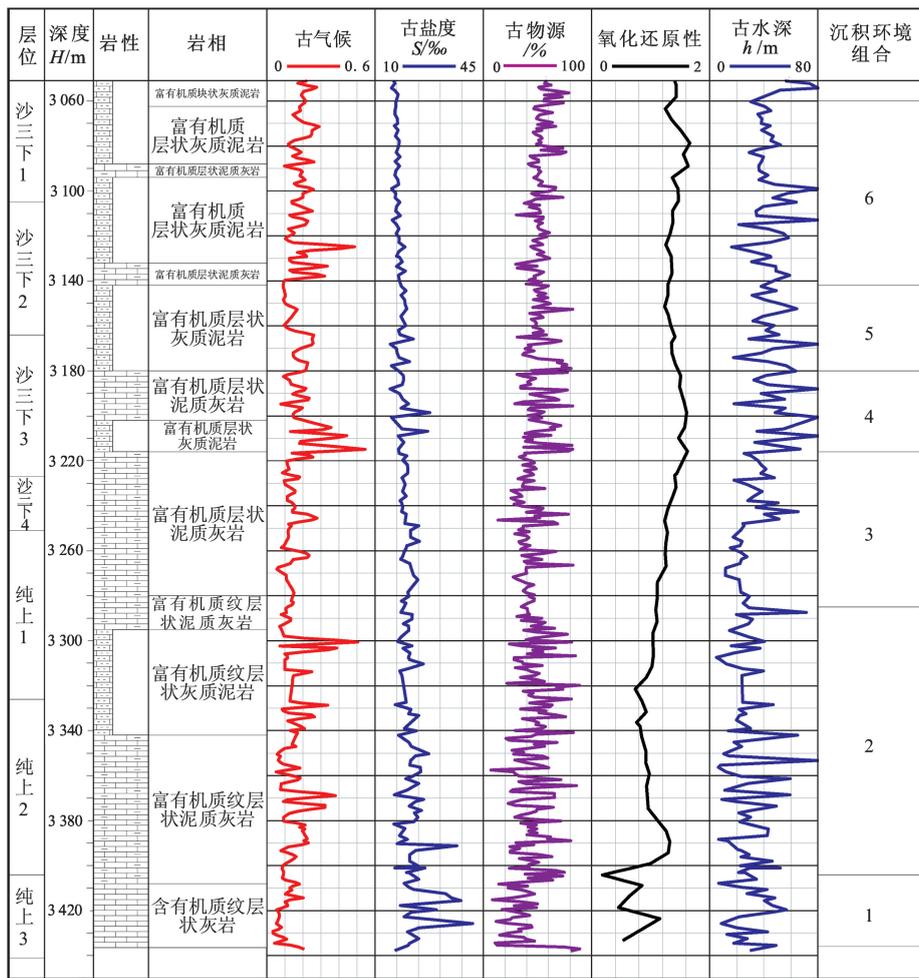


图 1 东营凹陷沙四上—沙三下亚段泥页岩岩相沉积环境分析

Fig. 1 Sedimentary environment analysis on shale facies lower Es₃-upper Es₄ in Dongying sag

2.2 古盐度

盐度是指介质中所有可溶盐的质量分数,是区

别海相和陆相环境的主要标志之一^[15]。古盐度是指保存于古沉积物之中的盐度。目前较常用的恢复

古盐度的方法包括:应用古生物、岩矿和古地理资料定性描述水体盐度,应用常量同位素和微量元素地球化学方法定量确定水体盐度,以及应用孔隙流体或液相包裹体直接测量盐度。在泥岩微量元素研究中,根据硼和黏土矿物含量计算古盐度方法相对较为完善,其中的 Couch 公式适应了较大的盐度范围,考虑了伊利石、蒙脱石和高岭石对硼的吸附作用的影响,应用此公式可以取得较好的结果^[16-18]。

利用 Couch 公式,计算出樊页 1 井沙三下一沙四上古盐度一般为 15‰~30‰,且从下向上盐度逐渐增大。根据黄第藩^[19]建立的盐度划分标准和研究区的实际情况,建立盐度划分标准:0.5‰~1.0‰为淡水,1.0‰~5.0‰为微咸水,5.0‰~15.0‰为半咸水,15.0‰~30.0‰为咸水,30.0‰~50.0‰为盐水。东营凹陷沙三下一沙四上亚段盐度主要为咸水环境,少部分为半咸水和盐水环境(图 1)。另外,该段的 Sr/Ba 基本大于 1(图 2),为咸水环境,且比值大小与盐度有很好的正比关系,与 Couch 公式的计算结果一致。

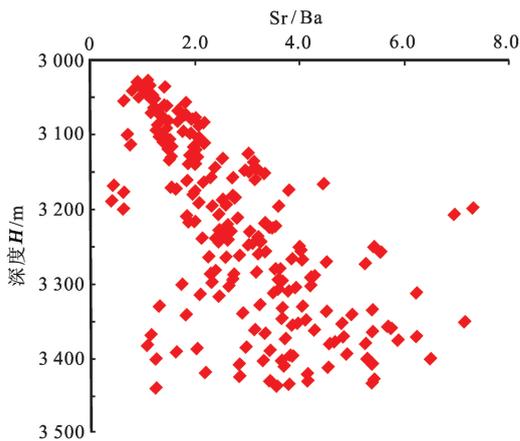


图 2 樊页 1 井沙三下一沙四上亚段 Sr/Ba 变化

Fig. 2 Sr/Ba of lower Es₃-upper Es₄ of Fanyei 1 well

2.3 古水深

对于湖泊古水深的研究,在方法上目前主要依靠沉积特征的定性研究和古生物法定量分析,目前应用比较多的是古生物法,其中颗石丰度法只适用于海相地层,介形虫分异度研究古水深的方法对样品的要求比较高,只能分析浅湖的沉积深度,而泥岩的沉积环境一般都是半深湖—深湖,因此用古生物法恢复泥岩古水深具有很大的不适应性。陈中红等^[20-21]根据伽马能谱测井的铀曲线恢复古水深,取得了一定的进展,本文中在本区也利用此方法恢复了古水深,但是效果不是很理想。一些地球化学元素指标也能反映相对古水深,因此本文中采用

Fe/Co 和地区平均水深来推算古水深。

Fe、Co 属同族元素,其物理、化学性质相近,在湖泊近岸条件下,Fe 的沉淀比例要比 Co 多,随着水体逐渐加深,Co 的含量是逐渐增加的。如果湖水遵循随着深度加大游离氧减少、还原性逐渐增强的变化规律,Fe/Co 可以指示古湖水相对深度,即 Fe/Co 值加大,水体变浅;Fe/Co 值减小,水体加深。据前人研究,东营凹陷沙四段和沙三下亚段平均古水深分别为 20 和 50 m^[22],结合 Fe/Co 值,就可以推算出不同沉积时期的古水深值。

根据对樊页 1 等井的计算结果,东营凹陷沙四上一沙三下古水深主要集中在 10~60 m 之间,从下到上水深逐渐加深(图 1)。为便于把水深和其他环境指标综合研究,将水深划分为 4 种类型,小于 20 m 为浅水,20~50 m 为半深水,50~70 m 为深水,大于 70 m 为超深水。东营凹陷沙三下一沙四上古水深主要为半深水—深水。

2.4 氧化还原性

反映古湖水氧化还原性的主要指标有 Cu/Zn、(Cu+Mo)/Zn、Ni/Co、V/(V+Ni)、Mo/Fe、Th/Uh 和 Pr/Ph(姥鲛烷/植烷)等^[23-24]。研究区的泥岩系统取心井中,元素分析未测得 Cu 和 Mo,Th/U 是通过自然伽马能谱测井获得的,几个指标的结果比较一致,指明研究区沙三下一沙四上亚段为还原—强还原环境,从分类标准的适用性方面考虑,本文中选用 Pr/Ph 作为氧化还原性指标,分类标准采用 0.2~0.8 为强还原、0.8~2.8 为还原、2.8~4.0 为弱氧化弱还原^[23]。从沙四上亚段到沙三下亚段,古水体从强还原性逐渐变为还原性(图 1)。另外,在研究区目的层段岩心中,可见到条带状自生黄铁矿(图 3);据樊页 1 井全岩矿物 X 衍射数据,黄铁矿最大含量达 48%,也说明了沉积环境的强还原性。

2.5 古物源

本文中所研究的古物源,主要是指陆源供给的数量。一般认为碳酸盐岩是内生的,黏土和粉砂是陆源输入的结果,另外 Th/U、Ti 和 Al/Ca 也被用来分析陆源输入的数量,但应用不是十分广泛。黏土和粉砂相对元素指标稳定性较强,因此本文中用黏土+粉砂的百分含量来代表物源的数量,并根据研究区的物源特点,划分了标准,即 ≥65% 为多物源、50%~65% 为较多物源、35%~50% 为较少物源、<35% 为少物源。东营凹陷物源主要集中在 20%~70%,从沙四上到沙三下亚段,物源逐渐增加,从较少物源到较多物源(图 1)。

利用东营凹陷泥页岩系统取心井的数据,从古气候、古物源、古水深、古盐度和古水体的氧化还原性5个方面分析了沉积环境,并建立了泥页岩沉积

环境指标分级标准(表2),可以进一步对泥页岩的环境进行量化分类。



图3 东营凹陷泥页岩中的黄铁矿

Fig. 3 Pyrite of shale core in Dongying sag

表2 泥页岩沉积环境恢复关键指标分级标准

Table 2 Classification standard of shale sedimentary environment

沉积环境指标		指标分级标准			
古气候	干湿指数	干燥 (0.0~0.1)	半干燥 (0.1~0.2)	半湿润 (0.2~0.4)	潮湿 (>0.4)
古盐度	盐度值 $S/\%$	淡水 (0.5~1.0)	微咸水 (1.0~5.0)	半咸水 (5.0~15.0)	咸水 (15.0~50.0)
古物源	黏土和粉砂/ $\%$	少物源 (<35)	较少物源 (35~50)	较多物源 (50~65)	多物源 (>65)
氧化还原性	姥植比	强还原 (0.2~0.8)	还原 (0.8~2.8)	弱氧化弱还原 (2.8~4.0)	
古水深	Fe/Co 计算 h/m	浅水 (<20)	半深水 (20~50)	深水 (50~70)	超深水 (>70)

3 泥页岩岩相与沉积环境的关系

根据建立的泥页岩岩相划分方案,东营凹陷沙四上亚段—沙三下亚段主要发育富有机质纹层状泥质灰岩相、富有机质纹层状灰质泥岩相、富有机质层状灰质泥岩相、富有机质层状泥质灰岩相和含有机质纹层状灰岩相等。结合对沉积环境各指标的分析表明,富有机质纹层状泥质灰岩相和富有机质纹层状灰质泥岩相形成的环境比较接近,在研究区常交互共生,主要形成于气候半干燥、咸水、半深水、较多物源的还原环境;富有机质层状泥质灰岩相和富有机质层状灰质泥岩相主要形成于气候半潮湿、半咸水、深水、较多物源的还原环境;含有机质纹层状泥质灰岩相和含有机质纹层状灰岩相主要形成于气候干燥、盐水、半深水、少物源的强还原环境(图1)。

从沙四上亚段—沙三下亚段,根据古气候,古水体的盐度、深度和氧化还原性,古物源等环境指标,大致可以划分为6个沉积环境组合(图1):组合1为气候干燥、物源少、沉积水体为半深水盐水的强还原环境,泥页岩的岩相主要为含有机质纹层状泥质灰(云)岩相、其次为含有机质纹层状灰(云)岩相和

含有机质纹层状灰(云)质泥岩相;向上气候过渡为半干燥,水体盐度降低到咸水范围、还原性减弱,当物源较多时,岩相为富有机质纹层状泥质灰岩相和富有机质纹层状灰质泥岩相(环境组合2),当物源较少时,岩相基本上只有富有机质纹层状泥质灰岩相(环境组合3),此时由于气候的蒸发作用减弱,无白云岩发育;环境组合4气候半潮湿,水体仍然为深水、咸水的还原环境,物源较多,岩相为富有机质层状泥质灰岩相和富有机质层状灰质泥岩相,二者所占比例相差不大;环境组合5和6与环境组合4比较相似,只有气候和水体盐度的变化,岩相组合上只是两种岩相比例大小的变化(表3)。

根据环境组合中各环境因素的变化和对应的岩相组合的变化,可以看出:泥页岩的有机质含量主要受盐度控制,盐水区为含有机质,咸水区和半咸水区为富有机质;泥页岩的构造主要受气候和水深控制,气候干燥—半干燥、半深水发育纹层状构造,气候半潮湿、深水环境发育层状构造;岩性主要受气候和物源控制,气候干燥、物源少发育泥质灰(云)岩和灰(云)岩,气候半潮湿、物源较多发育灰质泥岩。气候是沉积环境变化的主要原因,随着气候由干燥—

半干燥—半潮湿的变化,水体由半深水到深水、盐度从盐水到咸水到半咸水,沉积环境还原性逐渐减弱,物源增多;岩相特征上,有机质含量由少变多、构造上从纹层状过渡为层状、岩性上可以依次为白云

岩—灰岩—泥质灰岩—灰质泥岩—泥岩(图4)。

根据建立的岩相与沉积环境的对应和控制关系,可以由沉积环境的特点推测岩相类型,为寻找优势岩相发育区提供依据。

表3 东营凹陷沙四上—沙三下亚段沉积环境组合特征表

Table 3 Characteristics of sedimentary environment combination lower Es₃-upper Es₄ in Dongying sag

沉积环境组合	古气候	古盐度	古物源	氧化还原性	古水深	岩相组合(次序由多到少)	备注
6	半潮湿	半咸水	较多	还原	深水	富有机质层状灰质泥岩相 富有机质层状泥质灰岩相	
5	半干燥	咸水	较多	还原	深水	富有机质层状泥质灰岩相 富有机质层状灰质泥岩相	
4	半潮湿	咸水	较多	还原	深水	富有机质层状泥质灰岩相 富有机质层状灰质泥岩相	两种岩相比例相近
3	半干燥	咸水	较少	还原	半深水	富有机质纹层状泥质灰岩相	
2	半干燥	咸水	较多	还原	半深水	富有机质纹层状泥质灰岩相 富有机质纹层状灰质泥岩相	
1	干燥	盐水	少	强还原	半深水	含有机质纹层状泥质灰(云)岩相 含有机质纹层状灰(云)岩相 含有机质纹层状灰(云)泥质岩相	

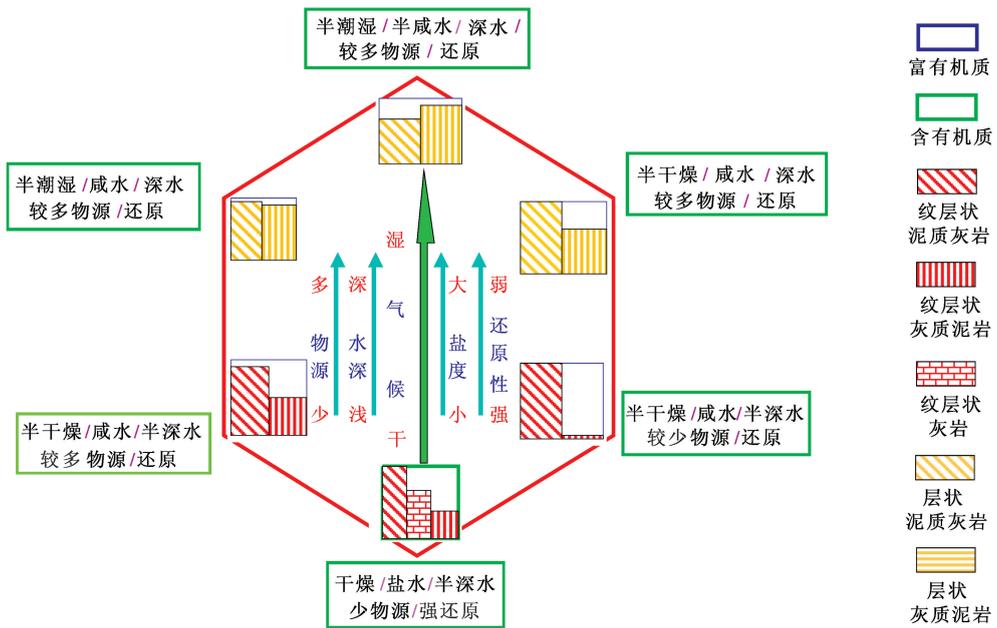


图4 沉积环境与岩相发育关系模式图

Fig. 4 Relationship model of sedimentary environment and facies

4 结论

(1) 东营凹陷沙四上亚段—沙三下亚段主要发育富有机质纹层状泥质灰岩相、富有机质层状灰质泥岩相、富有机质层状灰质泥岩相、富有机质层状泥质灰岩相和含有机质纹层状灰岩相等。

(2) 东营凹陷沙四上亚段—沙三下亚段沉积环境特征为气候为干燥—半干燥—半潮湿,水体半深水—深水,强还原—还原,盐度为盐水—咸水—为半咸水,物源为较少—较多物源。

(3) 建立了沉积环境与泥页岩岩相之间的关系;有机质丰度主要受盐度控制,结构主要受气候和水深控制,岩性主要受气候和物源控制,其中气候是沉积环境变化的主要原因,随着气候由干燥—半干燥—半潮湿的变化,沉积水体环境也发生相应变化,有机质含量由少变多,岩相构造上从纹层状过渡为层状,岩性上依次为白云岩—灰岩—泥质灰岩—灰质泥岩—泥岩。

致谢 感谢中石化股份胜利油田分公司地质院岩心室、地层室、地化室、开发实验室等相关人员对

岩心分析化验付出的辛苦劳动,以及姜秀芳、宁方兴、银燕、丁桔红、贾容等同事的指导和帮助。

参考文献:

- [1] GRABOWSKI J G, PEVEAR D R. Sedimentology and petrology of profundal lacustrine sediments, mahogany zone of the Green River Formation, Piceance Creek Basin, Northwest Colorado[J]. SEPM (Society of Economic Paleontologists and Mineralogists) Deep-Water Carbonates (CW6), 1985,6:386-430.
- [2] HERRON M M, GRAU J A, HERRON S L, et al. Total organic carbon and formation evaluation with wireline logs in the green river oil shale[R]. SPE 147184,2011.
- [3] 杨振恒,李志明,王果寿,等.北美典型页岩气藏岩石学特征、沉积环境和沉积模式及启示[J].地质科技情报,2010,29(6):56-66.
YANG Zhenheng, LI Zhiming, WANG Guoshou, et al. Enlightenment from petrology character, depositional environment and depositional model of typical shale gas reservoirs in North America[J]. Geological Science and Technology Information, 2010,29(6):56-66.
- [4] 邹才能,杨智,崔景伟,等.页岩油形成机制、地质特征及发展对策[J].石油勘探与开发,2013,40(1):14-27.
ZOU Caineng, YANG Zhi, CUI Jingwei, et al. Formation mechanism, geological characteristics and development strategy of nonmarine shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013,40(1):14-27.
- [5] 张枝焕,关强.新疆三塘湖盆地侏罗系油源分析[J].石油大学学报:自然科学版,1998,22(5):37-41.
ZHANG Zhihuan, GUAN Qiang. Analysis on oil and gas source of Jurassic in Santanghu Basin of Xinjiang area[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1998,22(5):37-41.
- [6] 黄志龙,马剑,吴红烛,等.马朗凹陷芦草沟组页岩油流体压力与初次运移特征[J].中国石油大学学报:自然科学版,2012,36(5):7-11.
HUANG Zhilong, MA Jian, WU Hongzhu, et al. Fluid pressure and primary migration characteristics of shale oil of Lucaogou formation in Malang sag[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012,36(5):7-11.
- [7] 姜在兴.沉积学[M].2版.北京:石油工业出版社,2010.
- [8] 郝运轻,谢忠怀,周自立,等.非常规油气勘探领域泥、页岩综合分类命名方便探讨[J].油气地质与采收率,2012,19(6):16-19.
HAO Yunqing, XIE Zhonghuai, ZHOU Zili, et al. Discussion on multi-factors identification of mudstone and shale[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012,19(6):16-19.
- [9] 刘惠民,张守鹏,王朴,等.沾化凹陷罗家地区沙三段下亚段页岩岩石学特征[J].油气地质与采收率,2012,19(6):12-15.
LIU Huimin, ZHANG Shoupeng, WANG Pu, et al. Lithologic characteristics of Lower Es3 shale in LuoJia area, Zhanhua sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012,19(6):12-15.
- [10] 付修根,王剑,汪正江,等.藏北羌塘盆地晚侏罗世海相油页岩生物标志物特征、沉积环境分析及意义[J].地球化学,2007,36(5):486-497.
FU Xiugen, WANG Jian, WANG Zhengjiang, et al. Biomarkers and sedimentary environment of Late Jurassic marine oil shale in Qiangtang Basin, northern Xizang and its geological significance[J]. Geochimica, 2007,36(5):486-497.
- [11] 彭雪峰,汪立今,姜丽萍.准噶尔盆地东南缘芦草沟组油页岩元素地球化学特征及沉积环境指示意义[J].矿物岩石地球化学通报,2012,32(2):121-129.
PENG Xuefeng, WANG Lijin, JIANG Liping. Geochemical characteristics of the Lucaogou Formation oil shale in the southeastern margin of the Junggar Basin and its environmental implications[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2012,32(2):121-129.
- [12] 张新荣,方石,胡克,等.敦化盆地晚全新世泥岩沉积中化学元素记录的古气候分析[J].干旱区地理,2011,34(5):726-732.
ZHANG Xinrong, FANG Shi, HU Ke, et al. Pleaeo-climate analysis of the geochemical element records in the Late Holocene peat deposits of Dunhua Basin, NE China[J]. Arid Land Geography, 2011,34(5):726-732.
- [13] 关有志.科尔沁沙地的元素、黏土矿物与沉积环境[J].中国沙漠,1992,12(1):9-16.
GUAN Youzhi. The element, clay mineral and depositional environment in Horqin Sand Land[J]. Journal of Desert Research, 1992,12(1):9-16.
- [14] 李守军,王明镇,郑德顺,等.山东济阳拗陷古近纪的气候恢复[J].山东科技大学学报:自然科学版,2003,22(3):6-9.
LI Shoujun, WANG Mingzhen, ZHENG Deshun, et al. Recovery of climate of palaeogene in Jiyang Depression of Shandong[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2003,22(3):6-9.
- [15] 何起祥.沉积岩和沉积矿床[M].北京:地质出版社,1978.

- [16] 游海涛,程日辉,刘昌领. 古盐度复原法综述[J]. 世界地质,2006,21(2):111-117.
YOU Haitao, CHENG Rihui, LIU Changling. Review of paleosalinity recovering methods [J]. World Geology, 2006,21(2):111-117.
- [17] 王敏芳,黄传炎,徐志诚,等. 综述沉积环境中古盐度的恢复[J]. 新疆石油天然气,2006,2(1):9-12.
WANG Minfang, HUANG Chuanyan, XU Zhicheng, et al. Review paleosalinity recovery in sedimentary environment[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2006,2(1):9-12.
- [18] 余焯,张昌民,李少华,等. 惠州凹陷珠江组泥岩地球化学特征及其地质意义[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2014,38(1):40-49.
YU Ye, ZHANG Changmin, LI Shaohua, et al. Geochemical characteristics and geological significance of mudstones from Zhujiang formation of Huizhou depression[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2014,38(1):40-49.
- [19] 黄第藩,李晋超. 关于松辽和华北中、新生代沉积相的某些问题[J]. 地质论评,1982,28(3):217-227.
HUANG Difan, LI Jinchao. Some questions about Mesozoic-Cenozoic sedimentary facies in the Songliao and North China basins [J]. Geological Review, 1982, 28(3):217-227.
- [20] 陈中红,查明. 铀曲线在沉积盆地古环境反演中的应用[J]. 石油大学学报:自然科学版,2004,28(6):11-15.
CHEN Zhonghong, ZHA Ming. Application of uranium curve to paleoenvironment inversion in sedimentary basin [J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science), 2004,28(6):11-15.
- [21] 代大经,唐正松,陈鑫堂,等. U的地球化学特征及其测井响应在油气勘探中的应用[J]. 天然气工业,1995,15(5):21-27.
DAI Dajing, TANG Zhengsong, CHEN Xintang, et al. U geochemical characteristics and the application of U logging response to oil-gas exploration[J]. Natural Gas Industry, 1995,15(5):21-27.
- [22] 翟光明,王慎言,史训知,等. 中国石油地质志(卷六)胜利油田[M]. 北京:石油工业出版社,1993:182-183.
- [23] 梅博文,刘希江. 我国原油中异戊间二烯烷烃的分布及其与地质环境的关系[J]. 石油与天然气地质,1980,1(2):99-115.
MEI Bowen, LIU Xijiang. The distribution of isoprenoid alkanes in China's crude oil and its relation with the geologic environment [J]. Oil & Gas Geology, 1980, 1(2):99-115.
- [24] 邓宏文,钱凯. 沉积地球化学与环境分析[M]. 兰州:甘肃科学技术出版社,1993:2-31.

(编辑 修荣荣)