

文章编号: 0253-2697(2014)04-633-13 DOI:10.7623/syxb201404003

东营凹陷西部沙河街组三段下亚段泥页岩沉积微相

张 顺¹ 陈世悦¹ 谭明友² 张云银² 孙变变¹ 龚文磊¹ 胡忠亚¹ 侯中帅¹

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院 山东青岛 266580; 2. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司物探研究院 山东东营 257022)

摘要:关于沉积微相,前人多针对粗碎屑骨架砂体沉积相开展研究工作,对泥页岩这种细粒沉积物的沉积微相很少关注。在一个沉积盆地中,细粒沉积物的总量巨大,在纵向上及平面上均广泛分布。以东营凹陷西部沙河街组三段下亚段(简称沙三下亚段)泥页岩为研究对象,系统划分泥页岩岩相类型。在骨架沉积相控制下,以泥页岩岩石类型及岩相特征为基础,综合控制泥页岩发育的水动力条件、古湖盆底形及事件沉积等因素,将东营凹陷西部沙三下亚段半深湖、深湖相进一步划分为平阔半深湖微相、水下隆起半深湖微相、深洼微相、浊积周缘微相、近岸水下扇前缘微相等。分析了不同微相在矿物组成、岩石类型及组构、成岩作用及测井曲线响应等方面的差异性,细粒沉积物微相的划分和研究对于泥页岩油气的勘探开发工作有重要指导作用。

关键词:东营凹陷西部;沙三下亚段;泥页岩;岩相;水动力条件;沉积微相

中图分类号:TE111.3

文献标识码:A

Characterization of sedimentary microfacies of shale in the lower third sub-member of Shahejie Formation, western Dongying sag

Zhang Shun¹ Chen Shiyue¹ Tan Mingyou² Zhang Yunyin² Sun Bianbian¹
Gong Wenlei¹ Hu Zhongya¹ Hou Zhongshuai¹

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

2. Geophysical Research Institute, Sinopec Shengli Oilfield Company, Shandong Dongying 257022, China)

Abstract: Previous studies on sedimentary microfacies are mainly focused on coarse clastic skeleton sand bodies, whereas less attention has been paid to shale-related fine-grained microfacies. This is despite that huge amounts of fine-grained deposits are widely distributed in sedimentary basins in both horizontal and vertical planes. This paper takes the example of shale lithofacies in the lower third sub-member of Shahejie Formation (Es_3^x), western Dongying sag for systematical classification of shale facies. Under the control of skeletal sand bodies, the semi-deep and deep lacustrine facies of Es_3^x is divided into five types of microfacies based on shale rock types and lithofacies characteristics, combined with the control of factors such as hydrodynamic conditions for shale development, palaeogeomorphologic features, and sedimentary events. These types include flat-broad semi-deep lacustrine microfacies, submerged uplift semi-deep lacustrine microfacies, deep depression microfacies, turbidite outer edge microfacies, and subaqueous fan front microfacies. Further, the differences in mineral composition, diagenesis, and log response among different microfacies are analyzed. The study on sedimentary microfacies of fine-grained deposits is of guidance value especially for oil and gas exploration in shale reservoirs.

Key words: western Dongying sag; the lower third sub-member of Shahejie Formation; shale; lithofacies; hydrodynamic conditions; sedimentary microfacies

沉积微相是在基本一致的沉积条件下形成的最基本的沉积单元。微相最初研究是在碳酸盐岩领域中,之后扩展到陆相碎屑岩。前人针对东营凹陷开展沉积相或者沉积微相研究,一般都是针对粗碎屑骨架沉积相开展研究工作的^[1-5],针对半深湖—深湖细粒沉积尚未开展沉积微相的研究。广义的泥页岩是指“细粒的

碎屑沉积岩”^[6],通常看似简单的细粒沉积在矿物组成、岩石结构及沉积构造等方面类型多样,是复杂的岩石组合,包括泥岩—粉砂岩—碳酸盐岩在垂向上形成的不同的叠置关系。岩性、物性与沉积环境密切相关,研究细粒沉积物形成的微环境及其特征对于泥页岩油气的勘探开发具有十分重要的指导意义。造成半深湖、

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 41372107)资助。

第一作者及通信作者:张 顺,男,1985年8月生,2009年获中国石油大学(华东)学士学位,现为中国石油大学(华东)地球科学与技术学院博士研究生,主要研究方向为沉积学与储层地质学。Email: satisfactoryshun@163.com

深湖泥页岩沉积环境存在差异的原因较为复杂,但从根本上说,主要是由于泥页岩沉积时期毗邻的骨架砂体类型不同、古地貌(即湖盆底形)存在差异、古气候及水动力条件不同,造成了不同构造部位或相同构造部位不同深度的泥页岩在垂向组合方式上呈现多种特征。

东营凹陷是典型的新生代陆相断陷湖盆,有110余口探井在泥页岩中见油气显示,显示了东营凹陷泥页岩油气勘探的巨大潜力。东营凹陷沙河街组三段下亚段(简称沙三下亚段 Es_3^*)是盆地强烈伸展、基底快速沉降、湿润气候条件下的产物,该沉积期湖盆水域宽且深,形成了半深湖、深湖相沉积。东营凹陷西部(主要指利津洼陷及博兴洼陷北部)沙三下亚段泥页岩分布面积广、厚度大。通过对东营凹陷西部重点泥页岩取心井利页1井(岩心长255 m)和樊页1井(岩心长413.14 m)以及“老井复查”油气显示的樊119井、樊120井等岩心的精细观察描述,结合岩石薄片鉴定、X射线衍射全岩矿物分析、扫描电镜分析以及激光共聚焦显微镜分析等方法,确定了东营凹陷西部沙三下亚段泥页岩的矿物组成、组构及微观沉积构造特征,明确了泥页岩岩相类型及主要特征。在此基础上,结合三维地震资料及录、测井资料,分析造成沙三下亚段泥页岩类型发育的水动力条件、古湖盆底形以及成岩作用等因素,对东营凹陷西部沙三下亚段半深湖、深湖相沉积进行沉积微相划分,系统总结不同类型泥页岩岩相及微相的发育规律及控制因素,明确微相的平面展布特征。

表1 东营凹陷西部沙河街组三段下亚段—沙河街组四段上亚段泥页岩全岩矿物组成

Table 1 Mineral composition distribution of shale in the lower Es_3 and the upper Es_4 in the western Dongying sag

层位		全岩矿物含量/%							
		黏土	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	黄铁矿	菱铁矿
沙河街组三段下亚段	区间	9~54	10~39	0~2	0~21	0~74	1~71	0~7	0~3
	平均值	30.14	21.37	0.17	5.23	31.17	8.06	2.89	0.89
沙河街组四段上亚段	区间	1~57	4~42	0.00	0~18	0~95	0~61	0~13	0~1
	平均值	19.21	21.21	0.00	4.46	42.54	9.43	3.00	0.14
沙河街组四段下亚段	区间	2~51	2~60	0.00	0~22	1~91	1~76	0~16	0~2
	平均值	21.38	21.06	0.00	7.19	27.25	18.75	4.00	0.31
总计	区间	1~57	2~60	0~2	0~22	0~95	0~76	0~16	0~3
	平均值	24.49	21.25	0.08	5.35	34.41	10.71	3.15	0.51

姜在兴^[23,24]根据中国东部湖相细粒沉积岩的特点,提出以碳酸盐、黏土矿物和有机质作为三端元划分岩石类型;以2%和4%作为低、中、高有机质的划分界限,再以黏土矿物和碳酸盐50%含量为界,进一步划分为高有机质页状灰岩、高有机质页状黏土岩、中有机质页状灰岩、中有机质页状灰质黏土岩、低有机质灰泥灰岩、低有机质块状黏土岩6个亚类。此划分方案依

1 岩相类型及特征

岩相及其组合与沉积环境密切相关,岩相特征可揭示同一亚环境或微环境不同部位能量的高低差异。泥页岩油气是未来一种主要的接替能源^[7,8],岩相特征是泥页岩油气研究的基础。前人分别以层理、结构、生物群、成因及纹理、矿物成分等作为依据,对海相泥页岩进行岩相划分^[9-16]。相对于海相,湖相沉积类型对气候变迁的响应更为敏感^[17],湖泊沉积物记录所反映的环境信息在不同尺度下存在差异,因此,对泥页岩岩相的合理划分和研究有利于分析东营凹陷半深湖、深湖的沉积微环境^[18]。

湖相泥页岩的组合类型主要取决于盆地的演化阶段,生物活动、古气候变迁和陆源碎屑物供给等也起着举足轻重的作用^[19]。矿物成分是陆源输入—沉积作用及(生物)化学沉积作用的共同结果,其差异是造成泥页岩类型多样的根本因素。薄片鉴定及X射线衍射分析发现,东营凹陷西部沙三下亚段泥页岩黏土矿物含量较低,而长英质和自生碳酸盐矿物含量较高,矿物组成变化较大(表1),与前人^[20-22]对东营凹陷泥页岩矿物组成特征研究的结论基本一致。颜色整体呈深灰色、灰色与灰黑色;沉积构造类型以纹层状构造、页理构造和块状构造为主,其中,纹层状构造最为发育。有机质是油气生成的物质基础,其含量能够反映气候条件及水体营养度。因此,合理的岩相划分方案应综合考虑上述因素。

据明确,且充分考虑了有机质在泥页岩沉积、成岩及储层形成中的重要作用。参照该方案,笔者对东营凹陷沙三下亚段泥页岩岩相类型进行划分,其中纹层状灰岩(姜在兴方案中的页状灰岩)、钙质夹层状灰岩(发育夹层状方解石的页状灰岩)、页状黏土岩、纹层状混合细粒岩、块状混合细粒岩是最为发育的5种岩相类型(图1)。

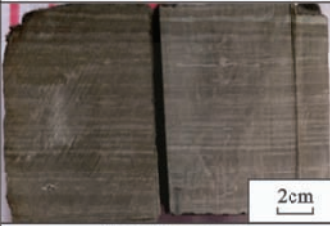
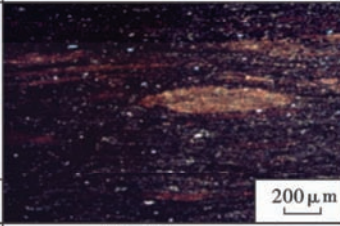

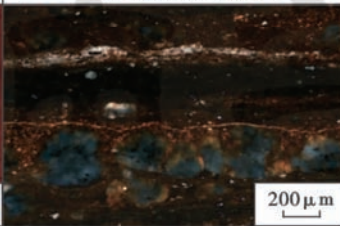

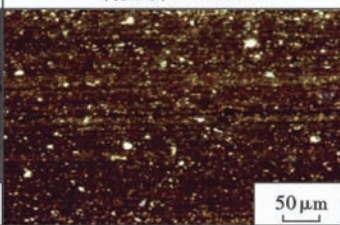

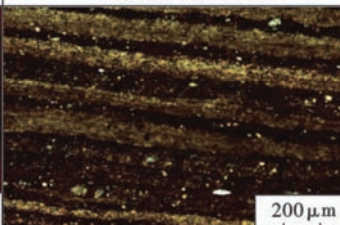

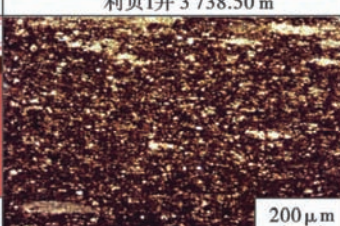
岩相类型	岩心照片	镜下照片	矿物组成				储集空间类型
			碳酸盐	石英	长石	黏土	
纹层状混合细粒岩			45%	26%	10%	19%	构造缝(高/中角度), 异常压力缝, 矿物收缩缝
夹层状灰岩			70%	16%	3%	11%	异常压力缝, 层间缝, 矿物收缩缝, 方解石晶间孔、溶蚀孔
页状黏土岩			51%	29%	3%	17%	层间缝, 矿物收缩缝, 黏土矿物溶蚀孔
纹层状灰岩			62%	26%	2%	10%	构造缝(高/中角度), 异常压力缝, 层间缝矿物收缩缝, 黏土矿物溶蚀孔
块状混合细粒岩			34%	21%	18%	27%	构造缝(高角度), 矿物收缩缝, 粒间孔

图 1 东营凹陷西部沙三下亚段主要泥页岩岩相特征

Fig. 1 Characteristics of shale lithofacies in the lower Es₃ in the western Dongying sag

泥页岩的岩相(组合)由于在成分、结构、含油气性等方面的差异,测井响应特征也存在明显不同^[25]。以樊页 1 井沙三下亚段 3 150~3 240 m 泥页岩发育段为例,不同岩相及其组合在测井曲线上的响应特征较明显,尤其是声波时差(AC)、补偿密度(DEN)、自然伽马(GR)、补偿中子(CNL)测井曲线(图 2)。纹层状灰岩及夹层状灰岩声波时差和电阻率均出现高值,表明其储集空间发育程度和油气富集程度高;与块状混合细粒岩相比,纹层状灰岩密度相对较小。纹层状混合

细粒岩(中有机质页状灰质黏土岩)在测井曲线特征上表现出较高补偿密度、中到高电阻率(R25、R4)、低补偿中子、中声波时差及中自然伽马的特点。层状构造在东营凹陷沙三下亚段泥页岩中较少见,且由于分辨率的问题在测井曲线特征上与纹层状构造难以区分,因此不做重点研究。低有机质块状混合细粒岩在测井曲线上总体起伏特征不明显,声波时差、补偿中子、自然伽马均呈现中到低值,密度值较高,视电阻率呈现低值(图 2)。

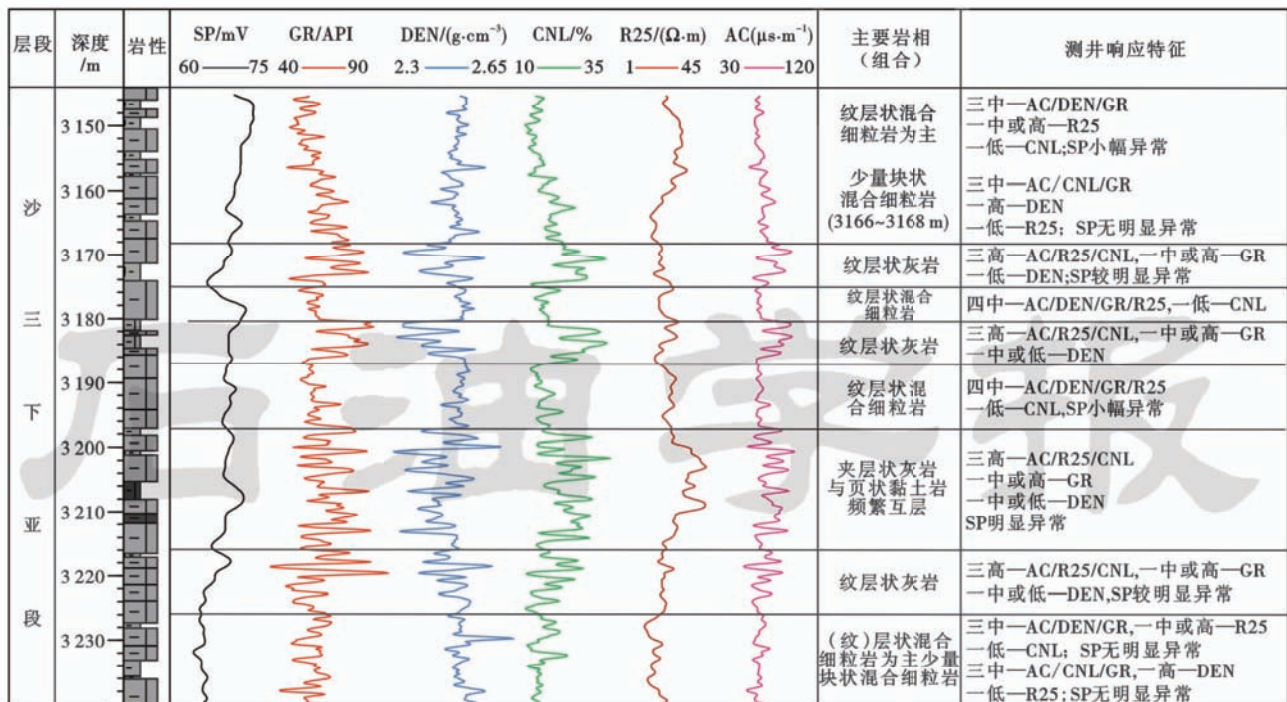


图2 樊页1井泥页岩岩相测井响应特征

Fig. 2 Log response characteristics of the shale lithofacies in Well Fanye-1

2 控制泥页岩类型发育的因素

造成半深湖、深湖相泥页岩岩相类型多样的原因较复杂,如水动力、古地貌、古气候、毗邻骨架砂体类型、距物源远近及入湖物质的组成等。从根本上说,主要是由于泥页岩沉积时期的古地貌(即湖盆底形)、古气候、水动力条件以及细粒沉积物沉积后发生的成岩作用不同,因此造成了半深湖、深湖相泥页岩类型多样,在垂向组合方式上呈现多种特征。这些控制因素也是细粒沉积物沉积相及沉积微相的重要相标志。

2.1 水动力条件及事件沉积

细粒沉积物的来源、分散、迁移、沉淀与水动力条件密切相关。通常认为相对稳定的半深湖、深湖环境,其内部水动力实则存在较大差异。这些水动力的变化可以通过岩相上的宏观特征(粒度变化、沉积构造特征、颜色等)体现出来。一般情况下,极细的黏土级($<4\mu\text{m}$)颗粒的沉积代表湖水中存在着使物质发生絮凝的条件;纹层的密集度、平整性及连续性也反映了水动力特征。由于入湖水流或者其他气候因素的影响,湖泊(沉积物)的沉积过程往往是不稳定的^[26],稳定沉积中偶尔夹杂着的部分不稳定沉积,反映出事件沉积或气候变化造成的局部层段的强水动力环境。

2.1.1 宏观岩相揭示的水动力特征

岩相中的纹层、粒序以及韵律变化不仅蕴含着丰富的气候变化、事件沉积等信息,更提供了细粒沉积物中的水动力条件强弱特征信息。

如图3(a)所示的似槽模,可能是由于水流的涡流作用使原始沉积的泥质颗粒侵蚀底部软泥,从而形成



(a) 似槽模, 水流的涡流作用形成侵蚀凹坑; (b) 浊流粉砂; (c) 纹层间粉砂细层断续呈波状, 湖底短暂微弱缺氧, 微弱水动力; (d) 页理发育, 细层平直, 免受水动力扰动; (e) e1 水平层理段, 纹层较平直且连续; e2 波状层理段, 局部纹层出现揉皱甚至错断(红色线代表小断层); e3 水平层理段, 纹层平直连续, 自下至上纹层数量减少; e4 粉砂质透镜体被泥质沉积物包围; e5 块状层理, 几乎不见纹层。

图3 岩心所揭示的水动力及沉积环境特征

Fig. 3 Core photos of hydrodynamics and sedimentary environment

侵蚀凹坑。纹层组(由方解石纹层与含有机质黏土层在垂向上叠置组成)夹有浅灰色的薄层状粉、细砂岩,厚度约为 2 mm,显断续波状层理[图 3(b)和图 3(c)],体现了阶段性浊流输入的影响^[17]。无论是何种成因,泥岩中出现的具有一定厚度的粉砂,表明当时湖水的分层状态并不十分稳定,指示湖底间或存在较弱的水流活动^[24]。除此之外,岩心底部可见细粒黄铁矿呈分散状分布,部分顺纹层密集产出[图 3(c)]。黄铁矿的出现并非都代表强还原环境,吴朝东等^[27]认为水体分层缺氧环境下的同生黄铁矿粒度一般小于 0.1 mm,呈星点状或密集球状分布;而成岩期形成的黄铁矿表面一般均匀、光亮,因此黄铁矿的出现与短暂充氧的微弱水动力条件并不矛盾。倘若纹层平直且颜色变化不明显,总体呈灰黑—黑色,页理发育,细层平直,代表基本平静的极弱水动力—滞水环境[图 3(d)]。从图 3(a)—图 3(d)可见,水动力总体上呈逐渐减弱趋势。

如图 3(e)所示,自 e1 至 e5,依次发育水平层理段、波状层理段、水平层理段、砂岩透镜体、块状层理段等。e1 中钙质纹层平直密集、连续性较好,反映了静水缺氧的弱水动力环境;e2 纹层发生弯曲变形,局部纹层出现揉皱甚至错断;由底部到顶部,深色纹层与浅色纹

层之间界限逐渐模糊,反映了微弱湖水底流活动或者是地震造成水体动荡使纹层在尚未固结时发生弯曲变形;至 e3 段出现与 e1 类似的水平纹层发育段;e4 代表被泥质包围的砂岩透镜体,透镜体不对称,指示水流方向。

2.1.2 细粒沉积物粒径揭示的水动力特征

季节性温度分层形成的层间流,以及湖盆底部常见的浊流是对湖相深水细粒沉积物影响最大的 2 种湖泊流体。在浊流到达不了的水下斜坡上,只发生深水沉积作用并且形成均匀的纹层状细粒沉积物。虽然对于粒度较细(通常小于 25 μm)的细粒沉积物而言,水体存在的电解质可以使细粒物质发生絮凝从而沉降,但是对于较深湖区,支配沉积物沉积作用的因素仍以物理沉积为主^[28-30]。

沉积物的粒径是确定水动力能量的重要地质要素^[31,32]。以东营凹陷西部利津洼陷为例,选取 50 余口钻穿沙三下亚段的重点井为研究对象,结合钻井及录井资料,将沉积物按泥质细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩、砂质泥岩、泥岩等不同粒级进行分类并统计,在平面上进行粒度百分含量饼状图的投点。结合饼状图的投点结果及宏观岩相揭示的水动力强弱信息,绘制沙三下亚段水动力特征分布图(图 4)。总体趋势是:靠

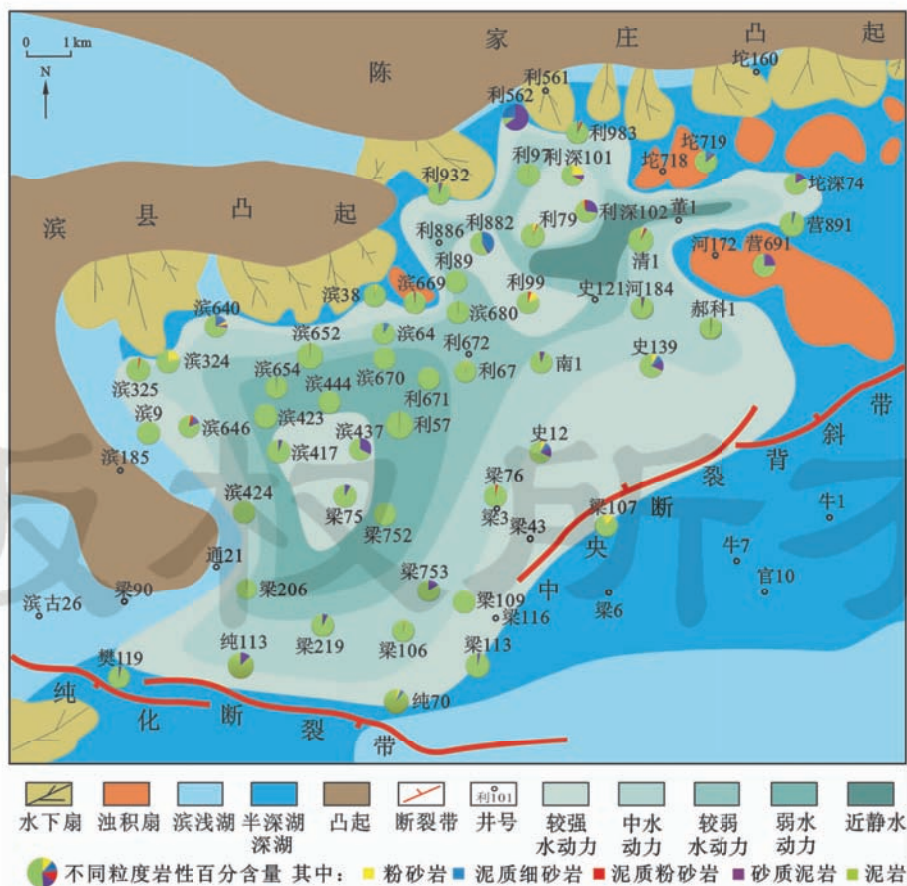


图 4 东营凹陷西部利津洼陷沙三下亚段沉积相与水动力特征

Fig. 4 Hydrodynamics characteristics and sedimentary facies of the lower Es₃ in Lijin subsag of Dongying sag

近北部陈家庄凸起、西北部滨县凸起以及南部断裂带地区水动力较强;从粗碎屑物源供给区至深洼区,沉积物粒度逐渐变小,湖水动力减弱;深湖区临近浊积岩发育区水动力普遍较强;通常认为的弱水动力深湖区往往会出现水动力较强的局部异常区。

发育大套泥页岩的深湖、半深湖环境水动力条件存在差异,其大小主要受物源远近、毗邻骨架沉积相类型及湖底重力流等因素影响。总体趋势是深洼中心为弱—近静水,靠近物源供给区水动力较强,由洼陷中心至湖岸水动力逐渐增强;局部出现的强水动力异常区发育相对较粗的细粉砂,主要为底流(浊流)等事件沉积成因。

2.2 古湖盆底形

湖盆形态对湖泊水体运动速度的大小和方向以及流场的结构和特征均有影响,进而影响各种物质在湖泊内的扩散输移^[33]。所谓古湖盆底形是指盆地演化过程中湖盆底部的地貌形态^[34]。一定规模的湖盆通常由多个次级盆地组成^[26],其中每个次级盆地的规模、形态和深度差异很大,而且有些湖泊还可以仅由湖底地形的微小起伏加以分隔。结合岩心观察描述及

50余口探井的录井资料分析可发现,不同构造部位以及不同体系域沉积的泥页岩,在泥页岩颜色、厚度及岩相组合类型等方面均存在明显差异。

根据三维地震资料解释以及测、录井资料,较精确地恢复了沙三下亚段沉积时期东营凹陷西部古湖盆的地貌,如图5所示,看似单一的半深湖、深湖区,湖底地形多样且起伏明显。利津洼陷内部近EW向断裂带(利89—南2—郝科1)将洼陷分为南北2个次洼。靠近陡坡带陈家庄凸起的北部次洼,深度明显大于南部次洼。湖盆总体特征与东营凹陷“北断南超”的构造格局吻合,但在深湖区内部呈现出多个“隆—坳相间”的局部构造面貌,体现了陆相断陷湖盆不同于坳陷湖盆及海洋的复杂地貌特征。湖底这种“隆—坳相间”的起伏形态其实是由多个局部地貌单元组成,不同的局部地貌单元,其水动力强弱特征及岩相发育特征均存在差异。湖底地形影响深水区的湖水循环,继而影响了半深湖、深湖相细粒沉积物的沉积过程和空间分布:水下微隆起沉积的细粒沉积物粒径稍大,反映簸选作用的环境;滞水深洼区主要沉积黏土级颗粒,其分布受水体性质及湖盆底形影响。

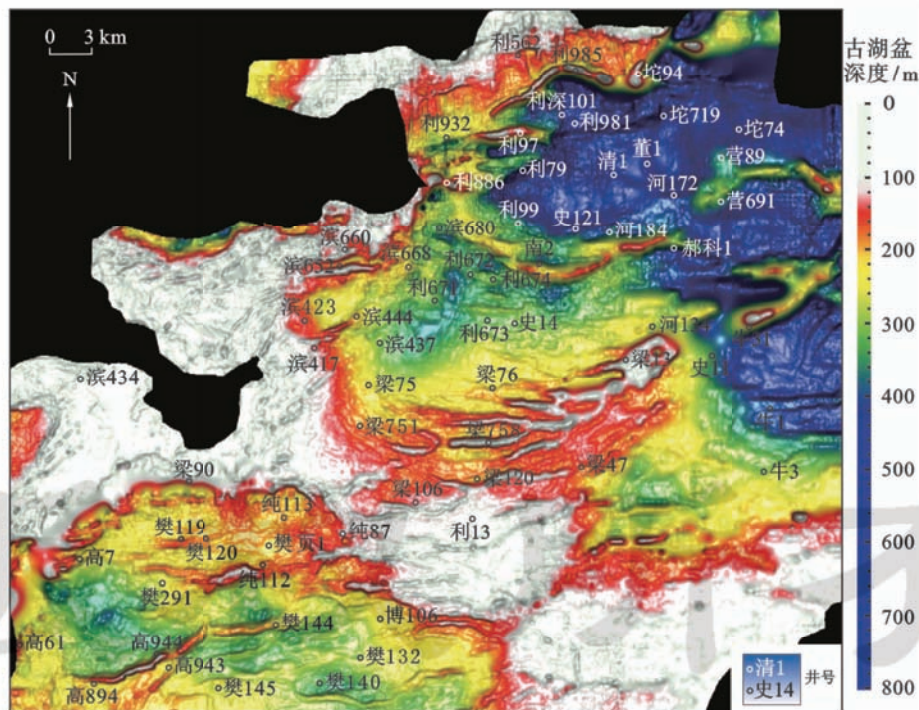


图5 东营凹陷西部沙三下亚段沉积期古地貌

Fig. 5 Palaeogeomorphology of the lower Es₃ in the western Dongying sag

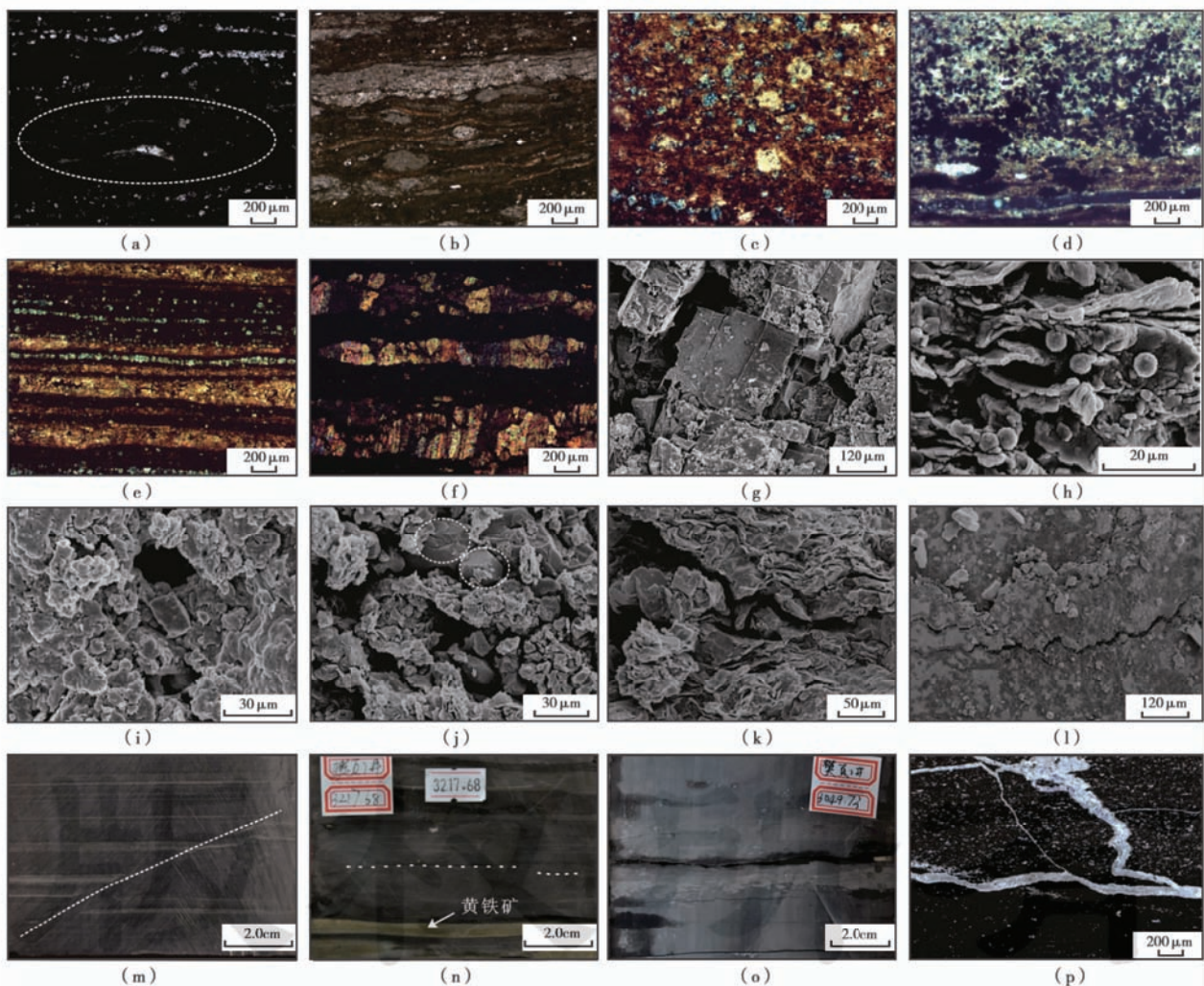
2.3 成岩作用类型

通过薄片观察、扫描电镜分析,东营凹陷沙三下亚段泥页岩层系在沉积埋藏过程中,主要经历了压实作用、交代作用、胶结作用、溶蚀作用、重结晶作用及黏土矿物转化等成岩作用类型:①压实作用:泥页岩沉积后

由于受到上覆地层压力,孔隙度降低、体积缩小,有机质纹层发生弯曲,塑性矿物(如云母)和生物碎屑被压变形并形成半定向—定向排列[图6(a)和图6(b)]。②交代作用:沙三下亚段泥页岩发育段的交代作用主要存在于陆源碎屑含量较高的粉砂质泥岩及泥质粉砂

岩中,交代类型一般为方解石或白云石交代石英、长石等碎屑颗粒,判断标志为交代残余边(结构)或矿物假象[图 6(c)]。③胶结作用:东营凹陷沙三下亚段沉积期,湖水常年处于分层状态,底介质为碱性硫化物相,属强还原环境,自生黄铁矿普遍发育,呈夹层状(夹层厚度多为 2.0~5.0 mm)、团块状、串珠状和分散状产出,镜下可见黄铁矿胶结作用[图 6(d)]。④重结晶作用:灰黑色泥页岩中常见夹层状、脉状方解石,有些体积较小的方解石呈断续透镜状排列;岩心观察呈灰白、纯白色;镜下观察,晶粒形态多呈垂直于纹层方向生长的晶柱状,具有明显重结晶的性质[图 6(e)~图 6(g)]。⑤溶蚀作用:泥岩沉积后由于流体性质发生变化,使黏

土、碳酸盐矿物等发生溶解,形成溶蚀孔隙;通过扫描电镜观察,黏土矿物溶蚀孔及方解石表面溶蚀孔隙[图 6(i)和图 6(j)]是东营凹陷沙三下亚段泥页岩中最常见的储集空间类型。⑥黏土矿物转化:是泥页岩中重要的成岩作用类型,是黏土本身性质和成岩环境共同作用的结果;东营凹陷西部沙三下亚段泥页岩黏土矿物以伊利石(平均含量 82%)及伊/蒙混层(平均含量 16.8%)为主,少量绿泥石(4.5%)及高岭石(4.3%);成岩过程中,黏土矿物转化脱水,导致黏土矿物层间收缩从而产生微裂缝[图 6(k)和图 6(l)]。除了上述成岩作用形成的储集空间类型,还发育构造缝、层间缝等,部分裂缝内充填方解石[图 6(m)和图 6(p)]。



(a) 压实作用下,介形虫碎片定向排列;(b) 有机质纹层弯曲变形;(c) 白云石交代石英颗粒;(d) 黄铁矿富集,局部可见黄铁矿胶结作用;(e) 方解石重结晶形成的晶间孔,薄片照片上方可见铁白云石纹层及有机质纹层;(f) 方解石晶粒垂直于纹层方向生长;(g) 扫描电镜下观察方解石晶间孔;(h) 黏土矿物晶间孔;(i) 黏土矿物溶蚀孔隙;(j) 晶粒表面的溶蚀孔隙(白色圈内部分);(k) 和 (l) 黏土矿物收缩形成的微裂缝;(m) 构造缝将纹层错断(白色虚线部分);(n) 层间微缝(白色虚线部分)槽模,岩心照片底部可见黄铁矿夹层;(o) 浅灰色部分为断续粉砂质条带,与深灰色泥岩之间可见近水平裂缝;(p) 泥页岩裂缝被方解石充填。

图 6 东营凹陷西部沙三下亚段泥页岩成岩作用及储集空间类型

Fig. 6 Diagenesis and reservoir space of the shale of the lower Es₃ in the western Dongying sag

3 沙三下亚段泥页岩微相

3.1 泥页岩微相划分方案

相对于海相沉积,湖泊沉积具有相对连续、沉积速率大的特点^[35,36],蕴含沉积构造、气候、水动力等丰富的环境信息,且这些环境要素是相互制约的。作为陆源碎屑沉积的最细粒部分,半深湖、深湖相泥页岩形成于相对广阔稳定的沉积环境中,在沉积过程及空间展布上对主要环境要素的反应更为敏感和复杂^[10]。看似单一的半深湖、深湖环境,其内部的地貌形态、距离物源区的远近、水动力条件存在差异,造成了不同微相属性的泥页岩在矿物成分、岩石组构、岩性组合、垂向序列、成岩作用等方面具有很大的差异,因此,有必要对其进行微相类型的划分及特征分析。

海相页岩由于沉积环境、地层较稳定,岩相及微相研究方面可借鉴的成果较少,陆相湖盆尤其是断陷湖

盆相变快、非均质性强,目前关于半深湖、深湖细粒沉积物的微相研究尚处于探索状态。从岩心观察描述入手,在骨架沉积相控制下,以泥页岩岩石类型及岩相特征为基础,综合控制泥页岩发育的水动力条件、古湖盆底形及事件沉积等因素,对半深湖、深湖相进行微相的划分和厘定;以沙三下亚段湖侵体系域有机质最为富集的层段为重点研究对象,总结不同微相泥页岩组合特征,分析不同微相的测井相特征及在矿物成分、成岩作用类型等方面的差异。在此基础上明确东营凹陷西部沙三下亚段泥页岩微相的空间展布特征。

3.2 泥页岩微相类型

按照微相划分方案,可将东营凹陷沙三下亚段半深湖、深湖相泥页岩沉积划分为平阔半深湖微相、水下隆起半深湖微相、深洼微相、浊积周缘微相、近岸水下扇前缘微相等。重点分析泥页岩发育的平阔半深湖、水下隆起半深湖、深洼、浊积周缘等4个微相(图7)。

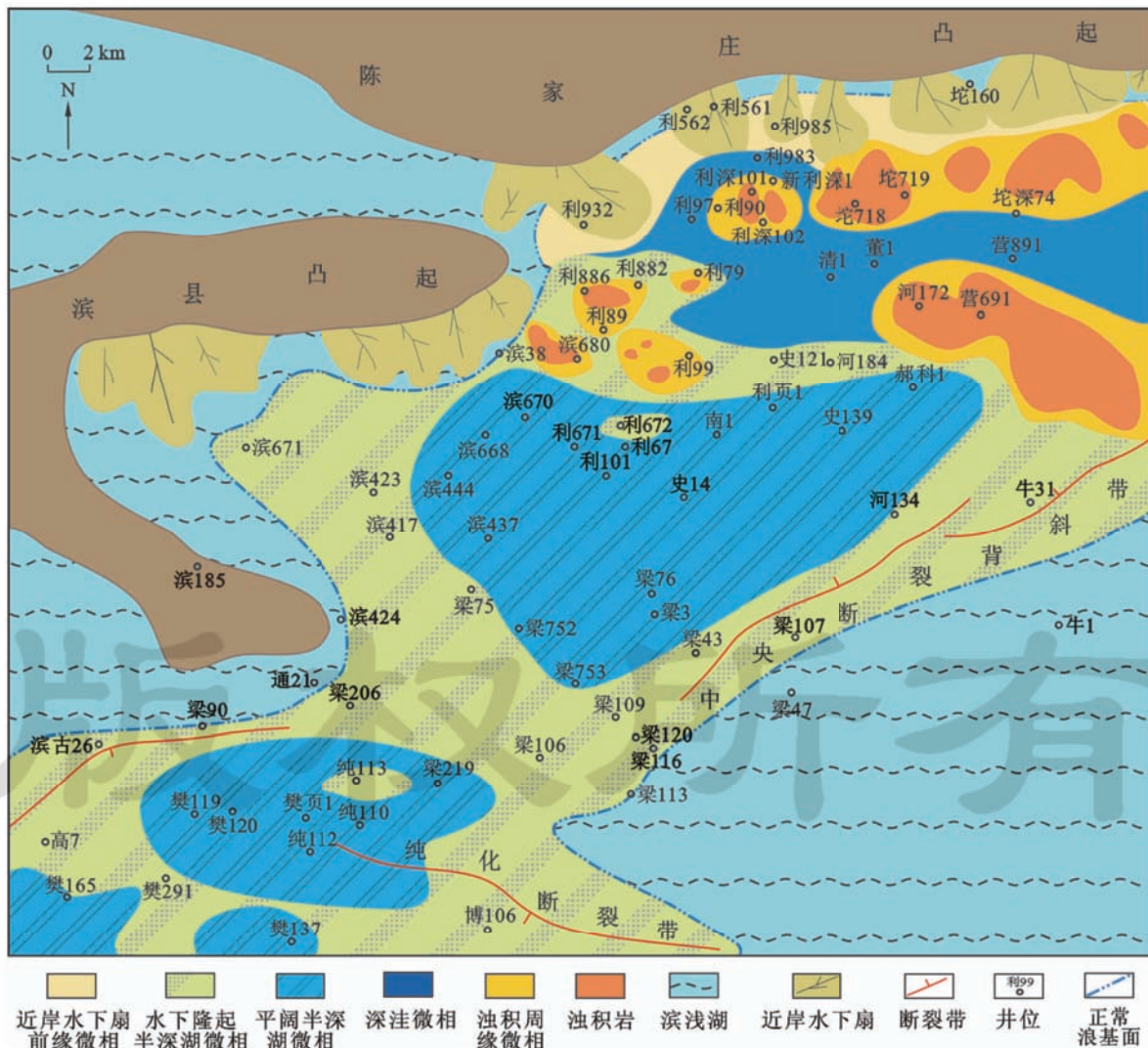


图7 东营凹陷西部沙三下亚段泥页岩沉积微相

Fig.7 Sedimentary microfacies of the shale in the lower Es₃ in the western Dongying sag

3.2.1 平阔半深湖微相

平阔半深湖微相发育在水体相对较深的平坦广阔区域,是东营凹陷西部沙三下亚段沉积期最为发育的泥页岩微相类型。由于远离西北物源区,平阔半深湖微相发育粒度较细的灰质泥岩、泥岩和泥灰岩,偶尔可见厘米级的薄层粉砂;水动力强度较弱到近静水。因为距物源区较远,且有断裂带及水下斜坡阻碍使浊流难以到达,平阔半深湖微相往往只发生深水沉积作用并形成均匀的纹层状细粒沉积物,对应的岩相类型为高有机质纹层状灰岩、夹层状灰岩和少量高有机质页状黏土岩。沉积构造在垂向上表现出块状—(纹)层状—页状—纹层状—块状的演化特征,反映水体由浅到深再到浅的变化。岩心观察发现,夹层状灰岩与页状黏土岩伴生,有时1 m范围内白色钙质夹层与灰黑色页状黏土岩频繁互层,页理构造发育。成岩作用主要为压实作用(镜下可见有机质层发生弯曲变形、细小石英颗粒近定向排列)、胶结作用和方解石的重结晶作用。裂缝类型多样,层间微缝大量发育,次为异常高压缝及构造缝;孔隙类型以黏土矿物晶间孔、方解石重结晶形成的晶间孔及溶蚀孔为主。测井曲线上表现为自然伽马起伏明显的指状及尖峰状,整体GR值中到高(50~90 API);补偿密度值(DEN)整体较小,呈齿形—箱形的沉积特征;补偿中子(CNL)曲线与密度曲线呈较显著的镜像对称关系,补偿中子总体呈高值;声波时差(AC)中到高值[图8(a)—图8(c)]。

3.2.2 水下隆起半深湖微相

水下隆起半深湖微相主体发育在平阔半深湖微相的周缘外围区域,在平阔半深湖微相内部也可见带状、圆丘状水下局部微隆起,如利672井等,水下隆起半深湖微相发育的范围较小,加之靠近滨浅湖区,水动力条件强于平阔半深湖微相。沙三下亚段沉积期的水下隆起半深湖微相在岩石垂向序列上表现为砂质泥岩、泥质粉砂岩、泥岩与灰质泥岩的互层[图8(d)],岩相组合以粉砂岩与纹层状混合细粒岩为特征。岩心观察及录井显示,泥质粉砂与粉砂主要发育在沙三下亚段的中下部,厚度集中在1.5~4.0 m,其余几乎为深灰、灰色泥页岩,发育纹层状构造和少量块状构造。成岩作用主要为压实、胶结、溶蚀和少量的交代(方解石交代石英等碎屑颗粒)作用。发育少量异常高压缝和构造缝,孔隙类型主要为粒间孔及溶蚀孔。测井曲线特征与平阔半深湖微相类似但又有所不同,整体表现出中自然伽马(40~60 API)、中—高密度、中视电阻率、低补偿中子的特征,补偿中子测井与密度测井曲线叠合幅度差较小,仅在砂岩段有较小幅

度起伏[图8(d)]。

3.2.3 深洼微相

深洼微相为深湖亚相的水体最深处,平面上位于浊积周缘微相与分隔利津洼陷的断裂带之间的区域。水进期,浊流带来少量粗碎屑物质,但总体上湖水大部分时间处于分层状态,底层水长期处于闭塞滞流状态,利于有机质的保存^[37,38]。以清1井为例,岩性剖面上为大套的灰黑色泥岩与厚度不大的砂质泥岩或者粉砂岩互层[图8(e)]。泥页岩岩相类型以高有机质页状黏土岩为主,黏土层之间可见细小石英碎屑顺纹层分布。成岩作用主要为压实作用,发育矿物收缩缝及层间缝。测井曲线上,黏土岩段自然伽马中值,泥质(粉)砂岩段自然伽马呈尖峰低值;密度测井与补偿中子测井均为中值,叠合无明显幅度差;声波时差总体高值,泥质粉砂岩段尖峰低值[图8(e)]。

3.2.4 浊积周缘微相

沙三下亚段沉积时期,在靠近北部陡坡带近岸水下扇前缘的深湖区发育了大量浊积岩(图7),在沙三下亚段沉积期骨架沉积相图上,浊积岩呈串珠状分布在靠近北部物源的深洼区。浊流是东营凹陷沙三下亚段沉积期重要的事件沉积类型[图8(f)],可将细粒悬浮负载搬运到距湖岸较远的深湖中。作为典型的毗邻骨架砂体的泥页岩微相类型,浊积周缘微相主要发育在浊积岩周围的深湖区。尽管水体较深,但由于紧邻浊积砂体,因此水动力条件多变,总体强度为较强到中等。由于浊积岩分布较为广泛,因此发育于半深湖区和深湖区的浊积周缘微相在特征上又有所不同[图8(g)和图8(h)],但总体上看岩石类型为泥质砂岩、砂质泥岩、深灰色泥岩及少量细砂岩和灰质泥岩。泥页岩岩相类型以块状混合细粒岩及页状、块状黏土岩为主。成岩作用类型主要为压实、胶结和溶蚀作用。相比于平阔半深湖及水下隆起半深湖微相,浊积周缘微相在岩性剖面上砂、泥互层频繁,且含泥砂质层厚度较大。测井曲线响应方面,自然伽马曲线为微齿状及箱状(60~80 API);密度与中子孔隙度测井曲线起伏明显、叠合幅度大;声波时差曲线起伏较大、差异明显。

3.3 泥页岩微相展布特征

整体上看,东营凹陷西部沙三下亚段沉积期半深湖、深湖相面积较广。以利津洼陷北部为代表的深湖亚相,由于靠近北部陈家庄凸起陡坡台阶带,是沉积动力学特征发生突变的活跃区^[35];受近岸水下扇及浊流影响明显,内部水体环境并不总是安静缺氧,浊积周缘微相主要分布在串珠状浊积岩周围外侧深湖区,面积较大,几乎占据了利津北部次洼面积的一半。与浊积

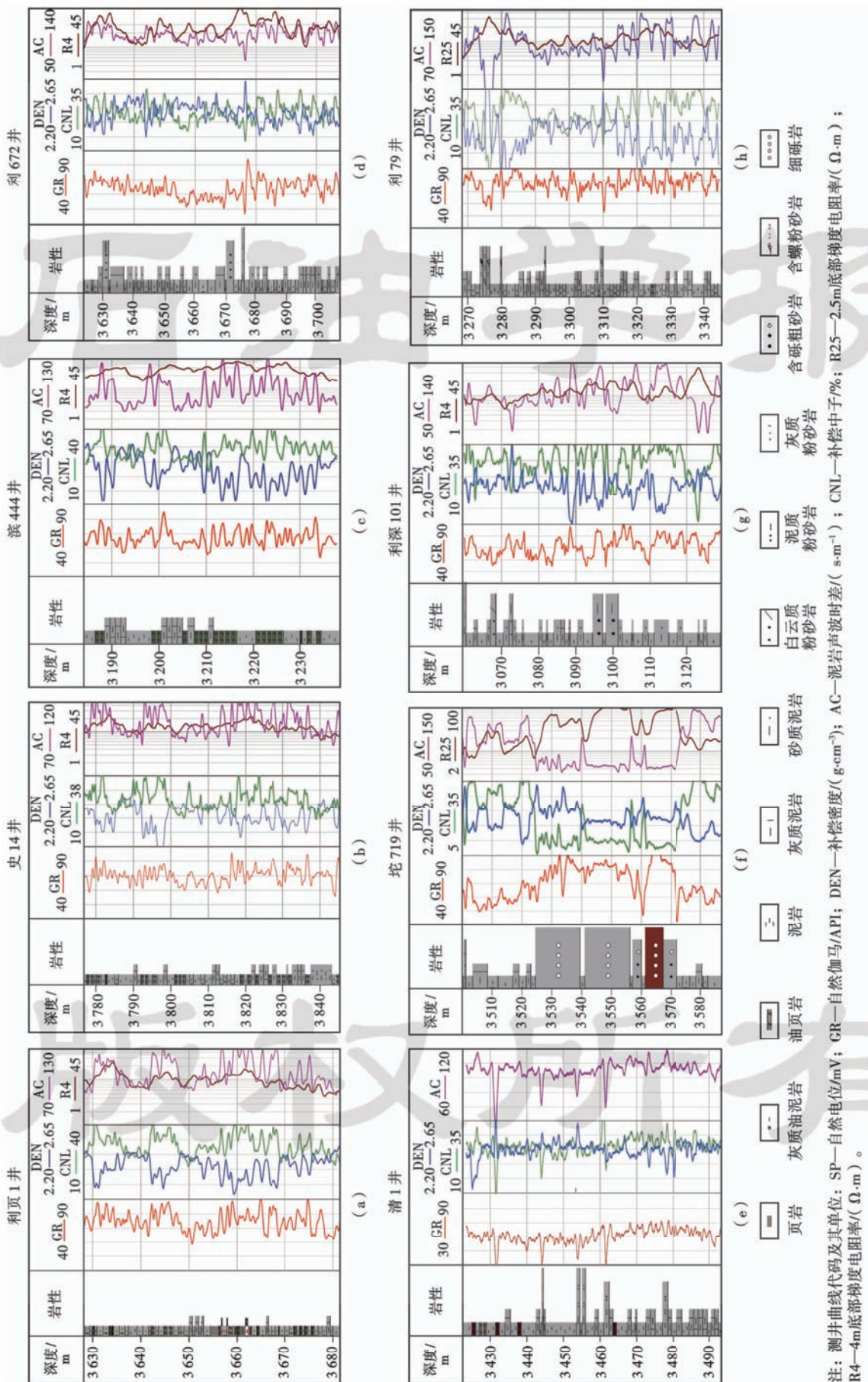


图 8 泥页岩微相测井曲线特征
Fig. 8 Logging characteristics of shale microfacies

周缘微相相比,深洼微相的范围较小,主要分布在离物源区相对较远的深湖区,除了在水进期少量粗碎屑物质入湖,深洼微相主要发育大套暗色泥页岩,岩相以页状黏土岩、纹层状混合细粒岩为主。

平阔半深湖微相主要发育在利津洼陷南部和博兴洼陷北部,古地貌特征显示湖盆底形总体平坦开阔,面积较大;由于远离物源区,加之浊流也难以抵达,沙三下亚段沉积时期,平阔半深湖微相沉积的细粒沉积物中粉砂及泥质粉砂含量极少;相对于深湖区水体较浅,平阔半深湖微相受湖平面影响较大,发育的岩相类型也较为复杂,纹层状灰岩、纹层状混合细粒岩、夹层状灰岩及页状黏土岩均有分布,但总体上以纹层状灰岩与纹层状混合细粒沉积岩为主,页状黏土岩较少。水下隆起半深湖微相主要在半深湖的水下隆起区,总体上呈环带状分布在平阔半深湖微相的外缘,少量在平阔半深湖内部因局部隆起也发育水下隆起半深湖微相。整体上看,水下隆起半深湖微相在岩石类型及发育的岩相特征等方面与平阔半深湖微相类似,只是由于水体相对较浅,地貌相对隆起,因此粉砂及泥质粉砂级的沉积物相对较多,该特征在测井曲线上难以识别[图8(b)、图8(h)],但通过岩心观察及古地貌特征可加以区分。自湖岸至湖盆中心,微相总体呈环带状分布,局部地貌起伏使次级洼陷内部又有所变化;自北向南,沉积微相的展布也体现了断陷湖盆北段南超的构造面貌及其内部的复杂特征。

4 结 论

(1) 岩相组合特征揭示了半深湖、深湖内部环境的差异,不同微环境中发育不同类型的岩石类型及其组合。半深湖、深湖相泥页岩沉积环境存在差异,主要是由于泥页岩沉积时期的古地貌(即湖盆底形)存在差异、气候及水动力条件不同,造成了不同构造部位、相同构造部位不同深度的泥页岩在垂向组合方式上呈现多种特征。因此可以在骨架沉积相控制下,综合泥页岩岩相特征、水动力特征以及古湖盆地貌特征等将湖相深水沉积进行微相的划分和厘定。

(2) 平阔半深湖微相、水下隆起半深湖微相、深洼微相、浊积周缘微相、近岸水下扇前缘微相等是东营凹陷西部沙三下亚段泥页岩主要的微相类型。自湖岸至湖盆中心,微相总体呈环带状分布,受古湖盆地形及事件沉积影响,局部出现强水动力区。

(3) 不同泥页岩岩相(组合)的沉积微环境属性和差异性分析,是开展不同微环境下泥页岩成因及沉积过程研究的重要基础。不同沉积微相属性的泥页岩在矿物成分、岩性组合、垂向序列、成岩作用等方面有较

大差异,直接影响了泥页岩储层的微观结构特征及油气富集过程,开展泥页岩沉积微相研究,对泥页岩油气的勘探开发具有重要指导作用。

参 考 文 献

- [1] 周红,杨永利,鲁国甫. 储层沉积微相研究以下二门油田核三段砂体为例[J]. 地质科技情报,2002,21(2):80-82.
Zhou Hong, Yang Yongli, Lu Guopu. Study on sedimentary microfacies; taking H3 submember of Xia'ermen oilfield as an example[J]. Geological Science and Technology Information, 2002, 21(2):80-82.
- [2] 李守军,王新征,杨国权,等. 胜利油田王家岗地区下第三系沙四段砂岩储集层类型及分布[J]. 石油大学学报:自然科学版,2002,26(4):16-22.
Li Shoujun, Wang Xinzhen, Yang Guoquan, et al. Type and distribution of sandstone reservoir of fourth member in Shahejie Formation of Palaeogene in Wangjiagang area of Shengli oilfield [J]. Journal of the University of Petroleum, China, 2002, 26(4): 16-22.
- [3] 陈世悦,鄢继华,袁文芳. 滨南、利津地区古近系沉积相演化[J]. 石油勘探与开发,2003,30(3):36-38.
Chen Shiyue, Yan Jihua, Yuan Wenfang. Evolution of sedimentary facies of the Paleogene in Binnan-Lijin areas, Dongying sag [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(3):36-38.
- [4] 蒋解梅,王新征,李继山,等. 东营凹陷沙四段滩坝砂微相划分与砂体横向预测—以王家岗油田王73井区为例[J]. 石油地质与工程,2007,21(4):12-15.
Jiang Jiemei, Wang Xinzhen, Li Jishan, et al. Microfacies classification of shoal bar sand and lateral Prediction of sandbodies of the fourth member of Shahejie Formation in Dongying depression [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2007, 21(4):12-15.
- [5] 康建威,陈小伟. 湖泊相沉积体系划分方案及其测井特征讨论[J]. 安徽地质,2007,17(1):9-12.
Kang Jianwei, Chen Xiaowei. A scheme of division of lacustrine sediments system and its logging features [J]. Geology of Anhui, 2007, 17(1):9-12.
- [6] 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案探讨[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.
- [7] 李玉喜,聂海宽,龙鹏宇. 我国富含有机质泥页岩发育特点与页岩气战略选区[J]. 天然气工业,2009,29(12):115-118.
Li Yuxi, Nie Haikuan, Long Pengyu. Development characteristics of organic-rich shale and strategic selection of shale gas exploration area in China [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(12):

- 115-118.
- [8] 邹才能,董大忠,杨桦,等. 中国页岩气形成条件及勘探实践[J]. 天然气工业,2011,31(12):26-39.
Zou Caineng, Dong Dazhong, Yang Hua, et al. Conditions of shale gas accumulation and exploration practices in China[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(12): 26-39.
- [9] Schieber J. Facies and origin of shales from the mid-Proterozoic Newland Formation, Belt Basin, Montana, USA[J]. Sedimentology, 1989, 36(2): 203-219.
- [10] Liang C, Jiang Z, Yang Y, et al. Shale lithofacies and reservoir space of the Wufeng-Longmaxi Formation, Sichuan Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(6): 736-743.
- [11] Loucks R G, Ruppel S C. Mississippian Barnett shale: lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 579-601.
- [12] Abouelresh M O, Slatt R M. Lithofacies and sequence stratigraphy of the Barnett shale in east-central Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(1): 1-22.
- [13] Aplin A C, Macquaker J H S. Mudstone diversity: origin and implications for source, seal, and reservoir properties in petroleum systems[J]. AAPG Bulletin, 2011, 95(12): 2031-2059.
- [14] Ali W, Gale J, Ruppel S C, et al. Lithofacies, depositional environment, Burial history and calculation of organic richness from wireline logs: a study of the Barnett shale in the Delaware Basin, Pecos Co., West Texas, and comparison with the Barnett Shale in the Fort Worth Basin[R]. WTGS Digital Publication # 08-120, 2009.
- [15] Hickey J J, Henk B. Lithofacies summary of the Mississippian Barnett shale, Mitchell 2 TP Sims well, Wise County, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4): 437-443.
- [16] 马文辛, 刘树根, 黄文明, 等. 四川盆地周缘筇竹寺组泥页岩储层特征[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2012, 39(2): 182-189.
Ma Wenxin, Liu Shugen, Huang Wenming, et al. Mud shale reservoirs characteristics of Qiongzhusi Formation on the margin of Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology, 2012, 39(2): 182-189.
- [17] 周立君, 侯贵卿. 深水黑色页岩的沉积过程[J]. 海洋石油, 2002(3): 75-80.
Zhou Lijun, Hou Guiqing. The sedimentary process of black shale in deep water[J]. Sea Petroleum, 2002(3): 75-80.
- [18] 康玉柱. 中国非常规泥页岩油气藏特征及勘探前景展望[J]. 天然气工业, 2012, 32(4): 1-5.
Kang Yuzhu. Characteristics and exploration prospect of unconventional shale gas reservoirs in China[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(4): 1-5.
- [19] 邓宏文, 钱凯. 深湖相泥岩的成因类型和组合演化[J]. 沉积学报, 1990, 8(3): 1-20.
Deng Hongwen, Qian Kai. The genetic types and association evolution of deep lacustrine facies mudstones[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1990, 8(3): 1-20.
- [20] 张林晔, 李政, 李钜源, 等. 东营凹陷古近系泥页岩中存在可供开采的油气资源[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(1): 1-13.
Zhang Linye, Li Zheng, Li Juyuan, et al. Feasibility analysis of existing recoverable oil and gas resource in the palaeogene shale of Dongying depression[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(1): 1-13.
- [21] 李钜源. 东营凹陷泥页岩矿物组成及脆度分析[J]. 沉积学报, 2013, 31(4): 616-620.
Li Juyuan. Analysis on mineral components and frangibility of shales in Dongying depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(4): 616-620.
- [22] 朱光有, 金强, 张水昌, 等. 济阳坳陷东营凹陷古近系沙河街组深湖相油页岩的特征及成因[J]. 古地理学报, 2005, 7(1): 59-69.
Zhu Guangyou, Jin Qiang, Zhang Shuichang, et al. Characteristics and origin of deep lake oil shale of the Shahejie Formation of Palaeogene in Dongying sag, Jiyang depression[J]. Journal of Palaeogeography, 2005, 7(1): 59-69.
- [23] 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.
Jiang Zaixing, Liang Chao, Wu Jing, et al. Several issues in sedimentological studies on hydrocarbon-bearing fine-grained sedimentary rocks[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 34(6): 1031-1039.
- [24] 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.
Jiang Zaixing, Zhang Wenzhao, Liang Chao, et al. Characteristics and evaluation elements of shale oil reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(1): 184-196.
- [25] 王永诗, 李政, 巩建强, 等. 济阳坳陷页岩油气评价方法—以沾化凹陷罗家地区为例[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 83-91.
Wang Yongshi, Li Zheng, Gong Jianqiang, et al. Discussion on an evaluation method of shale oil and gas in Jiyang depression: a case study on Luojia area in Zhanhua sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 83-91.
- [26] 王苏民, 张振克. 中国湖泊沉积与环境演变研究的新进展[J]. 科学通报, 1999, 44(6): 579-587.
Wang Sumin, Zhang Zhenke. New progress in study of lake sediments and environmental changes study in China[J]. Chinese Science Bulletin, 1999, 44(19): 1744-1754.
- [27] 吴朝东, 陈其英, 雷家锦. 湘西震旦-寒武纪黑色岩系的有机岩石学特征及其形成条件[J]. 岩石学报, 1999, 15(1): 453-461.
Wu Chaodong, Chen Qiyang, Lei Jiabin. The genesis factors and organic petrology of black shale series from the upper Sinian to

- the lower Cambrian, southwest of China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1999, 15(1): 453-461.
- [28] 莱尔曼 A. 湖泊的化学地质学和物理学[M]. 王苏民, 译. 北京: 地质出版社, 1989: 1-370.
- Lerman A. *Lakes chemistry geology physics*[M]. Translated by Wang Sumin. Beijing: Geological Publishing House, 1989: 1-370.
- [29] 玛特 A, 塔克 M E. 现代和古代湖泊沉积物[M]. 北京: 地质出版社, 1984: 1-216.
- Matter A, Tucker M E. *Modern and ancient lake sediments*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1984: 1-216.
- [30] 陈敬安, 万国江, 张峰, 等. 不同时间尺度下的湖泊沉积物环境记录——以沉积物粒度为例[J]. *中国科学: D 辑*, 2003, 33(6): 563-568.
- Chen Jing'an, Wan Guojiang, Zhang Feng, et al. Environmental records of lacustrine sediments in different time scales; sediment grain size as an example[J]. *Science in China; Series D*, 2004, 47(10): 954-960.
- [31] 谢远云, 王秋良, 李长安, 等. 湖泊沉积物粒度的气候指示意义——以江汉平原江陵剖面为例[J]. *地质科技情报*, 2004, 23(4): 41-43.
- Xie Yuanyun, Wang Qiuliang, Li Chang'an, et al. Climatic implication of grain size from lacustrine sediments; a case of study Jiangling section, Jianghan plain [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2004, 23(4): 41-43.
- [32] 姜在兴. 沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003: 1-540.
- Jiang Zaixing. *Sedimentology* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2003: 1-540.
- [33] 张发兵, 胡维平, 秦伯强. 湖底地形对风生流场影响的数值研究[J]. *水利学报*, 2004(12): 34-38.
- Zhang Fabing, Hu Weiping, Qin Boqiang. Numerical analysis on influence of topography on wind-driven current in lake[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004(12): 34-38.
- [34] 王多云, 李树同, 王彬, 等. 鄂尔多斯盆地三叠纪延长湖盆底形形态和岩性油藏分布特征[J]. *低渗透油气田*, 2007, 11(3): 12-21.
- Wang Duoyun, Li Shutong, Wang Bin, et al. Shape of lake basin bottom and characteristics of lithologic reservoir distribution in Yanchang Age, Triassic of Ordos Basin[J]. *Low Permeability Oil-gas Field*, 2007, 11(3): 12-21.
- [35] 褚喜准, 王琪, 朱筱敏, 等. 松辽盆地南部拗陷期湖盆底形演化及充填序列[J]. *石油学报*, 2009, 30(4): 536-542.
- Zhuo Xizhun, Wang Qi, Zhu Xiaomin, et al. Relationship between bottom morphology of lake basin and filling sequence during depression period in the southern Songliao Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 30(4): 536-542.
- [36] 张振克, 王苏民. 中国湖泊沉积记录的环境演变: 研究进展与展望[J]. *地球科学进展*, 1999, 14(4): 417-422.
- Zhang Zhenke, Wang Sumin. Advance and prospects of lake sediments and environmental changes study in China[J]. *Advances in Earth Science*, 1999, 14(4): 417-422.
- [37] 朱光有, 金强. 烃源岩的非均质性研究——以东营凹陷牛 38 井为例[J]. *石油学报*, 2002, 23(5): 34-39.
- Zhu Guangyou, Jin Qiang. Study on source rock heterogeneity; a case of Niu 38 well in Dongying depression[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2002, 23(5): 34-39.
- [38] 朱光有, 金强, 张水昌, 等. 东营凹陷沙河街组湖相烃源岩的组合特征[J]. *地质学报*, 2004, 78(3): 416-427.
- Zhu Guangyou, Jin Qiang, Zhang Shuichang, et al. Combination characteristics of lake facies source rock in the Shahejie formation, Dongying depression[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(3): 416-427.

(收稿日期 2014-01-10 改回日期 2014-04-26 责任编辑 熊 英)

版权所有