

湖相泥页岩细粒沉积组构成因及油气地质意义

——以济阳坳陷沙四上一沙三下亚段泥页岩为例

王勇, 熊伟, 郝雪峰, 朱德顺, 张顺

中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东东营, 257005

关键词: 细粒沉积; 沉积环境; 沉积组构; 沉积作用

细粒沉积岩是相对于常规储层的砂、砾粗粒沉积提出的, 尚无统一的定义, 通常是指粒度小于 0.1 mm/0.0039 mm 的细颗粒物质组成的沉积岩。关于细粒沉积在 20 世纪 30 年代就已提出 (Krumbein, 1932), 但受其沉积成因机制复杂、技术条件和资源潜力认识程度的限制, 研究进展缓慢, 尚未形成完整的沉积理论体系, 存在诸多问题, 直到现在关于细粒沉积的定义、术语、分类、沉积过程、形成条件和分布规律等仍存有争议。通过现代湖盆考察、微观解剖与水槽模拟实验, 揭示了泥页岩细粒沉积组构成因, 取得的成果不仅对济阳坳陷页岩油有利相带预测可提供理论依据, 也将会丰富沉积学理论, 具有重要的实践与理论价值。

1 地质概况

济阳坳陷勘探面积约 $2.62 \times 10^4 \text{ km}^2$, 经历了多期构造演化, 具有多期成盆、多凹共生的特征 (师德福等, 1987), 主要发育东营、惠民、沾化、车镇 4 个凹陷, 各凹陷内古近系发育沙一段、沙三下段和沙四上亚段 3 套泥页岩细粒沉积, 其中沙四上亚段泥页岩细粒沉积是半咸—咸化湖相沉积 (刘庆等, 2004); 沙三下亚段泥页岩细粒沉积是半咸—淡水湖相沉积 (高岗等, 1998); 沙一段泥页岩细粒沉积也是一套半咸—咸化湖相沉积 (朱光有等, 2003)。根据钻井资料揭示, 3 套泥页岩细粒沉积整体上具有厚度大、有机质丰度高, 有机质类型以腐泥型-混合型为主, 有机质成熟度分布范围宽的特点 (隋风贵等, 2007), 其中有机碳含量 TOC 大于

2.0%, 有机质成熟度 R_o 大于 0.5%, 厚度大于 50 m 的有利源岩区共 5524 km^2 。据三次资评资料, 3 套烃源岩的生烃量为 $631.6 \times 10^8 \text{ t}$, 排烃量为 $152.8 \times 10^8 \text{ t}$, 残留烃量为 $478.8 \times 10^8 \text{ t}$, 残留烃量为排烃量的 3 倍左右 (王永诗等, 2003), 具备页岩油大量富集的物质基础。

2 细粒沉积环境

济阳坳陷沙四上一沙三下亚段泥页岩细粒沉积主要发育在水深 (20~110 m)、物源 (陆源碎屑含量: 15%~75%)、盐度 (5%~35‰)、氧化—还原性 (Pr/Ph: 0.35~1.85) 的环境, 沉积环境具有环带状展布特点。利用沉积环境系统恢复结果, 建立泥页岩组构和沉积环境之间的关系, 探索泥页岩组构沉积主控因素。综合分析认为细粒沉积过程是气候控制下机械、生物和化学沉积混合作用的产物, 气候干旱期, 水体浓缩强烈, 以化学作用沉积为主, 主要形成富碳酸盐岩、膏岩类岩相; 在半湿润半干旱气候期, 机械作用与化学作用达到平衡, 混合岩类 (包括富有机质纹层状泥质灰岩与富有机质灰质泥岩频繁互层、富有机质层状泥质灰岩与富有机质层状灰质泥岩频繁互层) 最为发育; 气候湿润期, 水体大量注入, 物源供给充足, 以机械沉积的陆源碎屑类为主, 主要发育层状或块状灰质泥岩。

3 细粒沉积组构成因

济阳坳陷沙四上亚段、沙三下亚段泥页岩细粒沉积具有组构复杂的特点, 颗粒细小, 一般小于 $50 \mu\text{m}$, 绝大部分在 $20 \mu\text{m}$ 之下, 由于粒度细小, 多

注: 本文为国家重点基础研究发展规划 (973) 资助项目 (编号: 2014CB239100) 的成果。

收稿日期: 2019-01-10; 改回日期: 2019-03-20; 责任编辑: 章雨旭。 Doi: 10.16509/j.georeview.2019.s1.103

作者简介: 王勇, 男, 1977 年生, 博士, 高级工程师, 油气勘探专业, Email: wangyong731.slyt@sinopec.com。

以絮凝物形式沉积;组分复杂,包括黏土、碳酸盐、石英、长石、黄铁矿和有机质(平均丰度为 2.96%),反映了多物质来源;沉积构造多样,发育水平纹层、波状纹层、透镜状纹层、交错纹层、粒序层理以及冲刷面等,表明泥页岩沉积时的水动力条件复杂。

3.1 碳酸盐组分

济阳拗陷沙四上亚段、沙三下亚段深湖主要发育透镜状粗晶、纹层状微细晶、纹/层状隐晶和块状隐晶 4 种类型碳酸盐,其中,透镜状粗晶碳酸盐为成岩重结晶的产物;纹层状微细晶碳酸盐和纹/层状隐晶碳酸盐为藻类光合作用不断从水中萃取 CO_2 ,导致水体 CO_3^{2-} 浓度升高,与湖水表层携带的 Ca^{2+} 相互作用的产物,咸水环境有利于碳酸盐晶粒保存,碳酸盐多呈微细晶纹层状分布,微咸水环境水体较深,碳酸盐晶粒在 CCD 面以下通常会发生溶蚀,大多呈隐晶纹层状保存下来;块状隐晶碳酸盐是浅水地带沉积碳酸盐由重力流搬运至深水地带的产物。

3.2 陆源碎屑组分

济阳拗陷沙四上一沙三下亚段泥页岩细粒沉积碎屑组分主要包括石英和长石,以石英为主,含量一般在 20% 左右。通过大量薄片观察和统计认为石英主要有 3 种成因,以陆源成因为主,陆源石英由陆源搬运而来,常呈棱角状,50~200 μm ,顺层排列,长轴方向与纹层方向一致,在显微镜正交下观察边界清晰,矿物表面光滑,为一个完整颗粒;其次为自生石英,为蒙脱石、高岭石、伊/蒙混层转化为伊利石时所释放的二氧化硅,而后经过成岩演化形成自生石英。通常表现为边界模糊,矿物表面粗糙,在显微镜正交下观察,一般为几个颗粒的组合。由于形成温度不同,碎屑石英与自生石英可通过阴极发光来区别,碎屑石英系高温成因,常呈紫色到棕色阴极发光,而成岩期形成的自生石英,只要未经历变质作用,不具有阴极发光现象,其对应的光谱特征也不同;另外,还有生物成因的石英,薄片下,生物成因表现为表面光滑,呈椭球状特点。黏土矿物与石英含量明显的正相关性,表明黏土与石英来源基本一致,主要来源于陆源,以机械成因为主,但仍有部分以絮凝成因沉积。系统分析发现,絮凝沉积的黏土主要分布在盐度较高的沉积环境($\text{Sr}/\text{Ba}>2$),为解释絮凝机理,建立了不同盐度水体条件下的黏土絮凝模拟实验,絮凝模拟实验表明

随着盐度的增加,絮凝作用增强,但盐度达到一定程度,絮凝作用不在增强。电子探针研究表明,有机质分布区往往与黏土矿物的分布区域一致,认为出现这种地质现象可能有两种原因:一是粘土的环境有利于有机质的形成;另一种是富粘土环境有利于有机质保存。

3.3 沉积构造

通过精细岩芯观察和系统研究认为,济阳拗陷沙四上-沙三下亚段泥页岩细粒沉积应属于封闭安静湖盆沉积的产物,其内不仅发育有大量的纹层,还发育有“交错层理”、“冲刷面”和脊突构造等沉积构造。纹层主要有 5 种类型,包括波状钙质纹层,水平隐晶钙质纹层、水平亮晶钙质纹层、水平泥质纹层和水平含粉砂泥质纹层,其形成主要受气候、盐度、水深及物源供给等因素控制;“交错层理”和“冲刷面”为该区最为特殊的沉积构造,其成因与风暴、湖流和浊流有着密切的关系;脊突构造与泥岩中水快速排出有关。

4 沉积作用机理

利用物理模拟、典型解剖和野外观察等技术手段,结合研究区泥页岩细粒沉积环境、沉积组构等特征,探索泥页岩细粒沉积作用机理。认为浅湖区受物源控制明显,以低密度径流悬浮沉积为主,主要形成层(块)状灰质泥岩、泥岩,水下局部高部位,在生物化学作用下,主要形成(纹层)层状泥质灰(云)岩;由于该地区水动力相对较强,氧气含量较高,不利于有机质的大量保存,通常情况下有机质含量相对较低,一般有机碳含量小于 2%。半深湖区距湖缘较远,沉积受物源影响减少,而受季节作用影响明显加大,在其相对浅部,受到底流和重力流双重作用改造,形成不平直纹层(透镜状纹层、交错纹层、波状纹层、粒序纹层),整体上以机械絮凝和生物化学絮凝混合作用为主,形成不平直纹层泥质灰岩或灰质泥岩,在局部局域见有块状泥质浊流沉积;在靠近洼陷区域,底流和重力流作用不发育,往往发育平直纹层泥质灰岩和灰质泥岩;由于该区域水体相对较深,有机碳含量较高,一般大于 2%,往往发育富有机质纹层状岩相。深湖区沉积环境稳定单一,水深安静,在“CCD”以下的深湖环境,碳酸盐溶解速率大于供给速率而呈欠饱和态,导致深湖区碳酸盐含量相对减少,且断陷湖盆深湖区靠近陡坡,往往为多方向外来物源交汇

区, 外来物源含量相对较高, 主要发育层状灰质泥岩; 在局部区域受风暴等作用的影响, 往往发育粉砂质浊流沉积; 由于该区域水体安静, 有利于有机质的保存, 往往形成富有机质岩相。

5 结论

泥页岩细粒沉积不仅作为常规油气的生油岩和盖层, 亦作为非常规油气的储层, 成为勘探的直接对象, 细粒沉积基础研究取得的成果, 不仅为烃源岩非均质性研究, 而且对页岩油气有利相带预测可提供理论依据, 也将会丰富沉积学理论, 具有重要的实践与理论价值。

参 考 文 献 / References

- 高岗, 郝石生, 蒲秀岗. 1998. 藻干酪根在碳酸盐岩与泥岩中成烃特征对比. 石油实验地质, 20(3): 277~281.
- 刘庆, 张林晔, 沈忠民等. 2004. 东营凹陷湖相盆地类型演化与烃源岩发育. 石油学报, 25(4): 42~45.

师德福, 王秉海, 陈余康, 孔祥星, 李政. 1987. 中国石油地质志, 卷六, 胜利油田. 北京: 石油工业出版社.

隋风贵, 刘庆, 张林晔. 2007. 济阳断陷盆地烃源岩成岩演化及其排烃意义. 石油学报, 28 (6): 12~16.

王永诗, 金强, 朱光有, 郭长春. 2003. 济阳坳陷沙河街组有效烃源岩特征与评价. 石油勘探与开发, 30 (3): 53~55.

Krumbein W C. 1932 . The dispersion of fine-grained sediments for mechanical analysis. Journal of Sedimentary Research , 2(3): 140~149.

WANG Yong, XIAONG Wei, HAO Xuefeng, ZHU Deshun, ZHANG Shun : Fabric characteristics and its oil-gas significance of lacustrine mud shale fine-grained sedimentary: a case study of upper Es⁴ and lower Es³ member in Jiyang depression

Keywords: fine-gained sedimentary; sedimentary environment; composition and structure; sedimentation