

济阳坳陷古近系泥页岩成因相划分

郝运轻¹, 王 朴², 刘惠民², 谢忠怀², 毕彩芹³, 滕建彬², 方正伟²

(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东 东营 257015;
3. 中国地质调查局 油气资源调查中心, 北京 100029)

摘 要: 系统岩心观察和高密度薄片鉴定等分析测试资料研究结果显示, 济阳坳陷沙三下-沙四上泥页岩成分组成及构造类型主要受沉积作用控制, 岩石结构特征主要受成岩作用控制。根据泥页岩中方解石成因及重结晶程度, 结合岩石成分及构造特征, 将济阳坳陷沙三下-沙四上泥页岩划分为沉积主控型、沉积-成岩双控型及成岩主控型三大成因相。沉积主控型分布最为广泛, 岩相类型多样, 构造特征反映成因环境; 沉积-成岩双控型主要见于纹层状岩相, 由泥质纹层与显晶粒状方解石纹层互层构成; 成岩主控型以柱状、柱纤维状方解石垂直层面呈脉状、透镜状产出为特征。成岩主控型和沉积-成岩双控型泥页岩与页岩油气关系密切, 是重要的有利成因相类型。

关键词: 页岩油气; 成岩相; 成因相; 济阳坳陷

中图分类号: P588.2; TE122

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2016)06-0981-10

Genetic facies classification of Paleogene mudstone in Jiyang depression

HAO Yun-qing¹, WANG Pu², LIU Hui-min², XIE Zhong-huai², BI Cai-qin³, TENG Jian-bin² and
FANG Zheng-wei²

(1. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 2. Petroleum Exploration and Production Research Institute of Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying 257015, China; 3. Oil & Gas Survey, China Geological Survey, Beijing 100029, China)

Abstract: On the basis of core observation and high density slice identification, the authors consider that Es₃^x-Es₄^x mudstone in Jiyang depression is mainly controlled by sedimentation and diagenesis. The composition and structure types are mainly controlled by sedimentation, whereas crystal texture characteristics are mainly controlled by diagenesis. According to the genesis and degree of recrystallization of calcite, combined with the mineral composition and structure characteristics, the Paleogene mudstone in Jiyang depression can be divided into three types, i. e., sedimentation-controlled type, sedimentation and diagenesis-controlled type and diagenesis-controlled type. The sedimentation-controlled type is the most widely distributed type which includes various types of lithofacies and whose structural characteristics reflect the formation environment. Sedimentation and diagenesis-controlled type mainly appears as laminated rock facies consisting of interlayered laminae of the argillaceous and granular crystallized calcite. Diagenesis-controlled type is characterized by column or fiber-column calcite crystals in the veined or lenticular forms perpendicular to the bedding plane. The diagenesis-controlled type and sedimentation and diagenesis-controlled type are closely related to Oil and gas in shale, and they are the most favorable genetic lithofacies.

Key words: oil and gas in shale; diagenesis facies; genetic lithofacies; Jiyang depression

收稿日期: 2015-10-20; 接受日期: 2016-07-02

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目之课题(2014CB239102)

作者简介: 郝运轻(1973-), 女, 汉族, 博士, 高级工程师, 从事沉积储层综合研究工作, E-mail: haoyq.syky@sinopec.com。

Fund support: Subproject of State Key Basic Research Development Project (973 Plan)(2014CB239102)

济阳坳陷位于渤海湾盆地的东南部(图 1),是一个油气资源非常丰富的中生代断陷-坳陷复合型盆地。其古近系层序自下而上为孔店组、沙河街组 and 东营组,发育 4 套区域源岩:沙四上亚段(E_{s4}^s)、沙三下亚段(E_{s3}^s)、沙三中亚段(E_{s3}^s)和沙一段(E_{s1}^s) (图 2)。北美地区页岩油气商业开发取得巨大成功,带动了世界范围内页岩油气勘探和开发热潮。油田前期勘探实践及学者研究表明,济阳坳陷沙三下-沙四上湖相泥页岩中蕴含着巨大的油气资源(张林晔等, 2008, 2012),罗 42、河 54、永 54 等井试采均获得较好产能。前人对这套泥页岩进行过烃源岩(张林晔, 2008; 张林晔等, 2008, 2012)、岩石学(刘传联等, 2001a; 刘惠民等, 2012; 郝运轻等, 2012)和储层特征(王永诗等, 2013a; Hao *et al.*, 2014)研究,开展过页岩油气潜力评价工作(张善文等, 2012; 赵铭海等, 2012; 王永诗等, 2013b),对其成因形成了一定认识(邓宏文等, 1993; 王冠民等, 2004, 2005; 王冠民, 2005; 郝运轻等, 2012)。



图 1 济阳坳陷构造略图(转引自张林晔等, 2011)

Fig. 1 Simplified tectonic map of Jiyang depression
(after Zhang Linye *et al.*, 2011)

和北美地区页岩气产层海相页岩相比,济阳坳陷陆相泥页岩具有矿物组成多样、组分含量变化大、岩石类型多、相变快、结构及构造特征差异较大等特点,因此陆相页岩油气评价必须首先对岩石进行分类,陆相页岩油气勘探要实现成因预测必须首先落实岩石成因。本文在前人研究基础上,充分利用近年的 1 024 m 系统取心,通过岩心精细观察和高密度

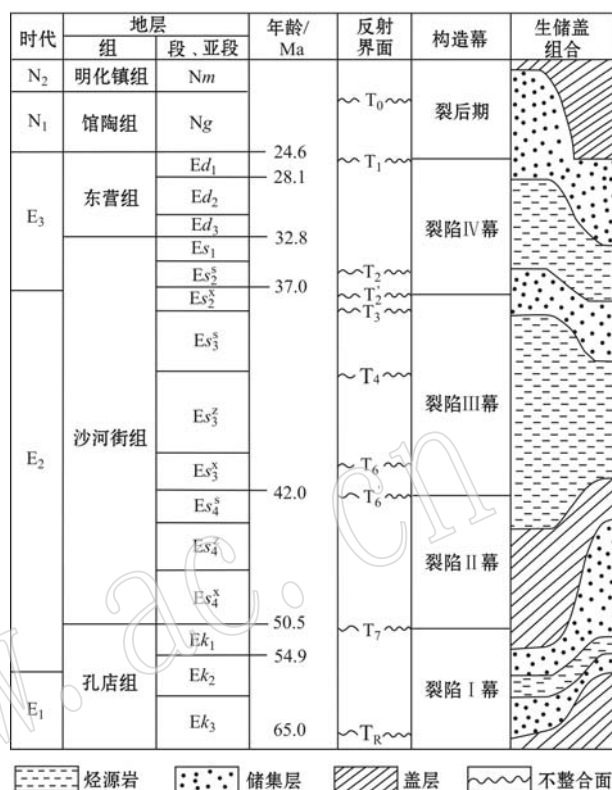


图 2 济阳坳陷层序及构造演化综合图(简化自张林晔等, 2011)

Fig. 2 Columnar section of sequence and tectonic evolution of Jiyang depression (modified after Zhang Linye *et al.*, 2011)

(2~4 块/m)薄片鉴定,结合 X 衍射和扫描电镜等测试结果,对济阳坳陷沙三下-沙四上泥页岩系统进行了成因相剖析,并把成因相与油气丰度、储集空间组合、源岩条件及岩石可压性进行了相关分析,初步落实了有利成因相类型,为陆相页岩油气精细分类评价和成因预测提供了客观依据。

1 岩石学特征

济阳坳陷沙三下和沙四上泥页岩是本区最重要的烃源岩,颜色深、结构细,构造特征总体以毫米级纹理构造为主,结构特征在岩心观察尺度难以识别。薄片鉴定能在毫米尺度准确把握岩石微观结构和构造特征,是研究泥页岩成因的最直观手段。但是,泥页岩组成矿物细小,薄片观察估计矿物含量时误差较大。X 衍射全岩分析能定量测定矿物成分及含量,但不能反映岩石结构、构造、产状及成因。本文

结合薄片鉴定和 X 衍射分析方法,优势互补,辅以岩心观察和电镜扫描,对泥页岩进行了成因相划分。

1.1 矿物组成与岩石类型

高密度薄片鉴定和 X 衍射全岩分析结果统计表明,济阳坳陷沙三下-沙四上泥页岩组成矿物复杂多变,按照成因可分为陆源碎屑和盆内化学沉积两类:陆源碎屑以粘土矿物和石英占绝对优势,有少量长石,粒级有的达粉砂级和极细砂级;盆内化学沉积矿物以方解石占绝对优势,有少量白云石、菱铁矿、硬石膏。总体看来,济阳坳陷沙三下-沙四上泥页岩以

碳酸盐含量高为其显著特点(平均含量接近或超过 50%),泥质矿物主要为粘土矿物和泥级石英碎屑,二者含量大致相当,总量在 40%左右(表 1)。

研究区泥页岩组成矿物复杂多变,因此岩石类型多样,为了简化岩石分类,将细粒陆源碎屑和粘土矿物归为泥质,碳酸盐归为灰质,则研究区古近系泥页岩主要归为 4 种岩石类型:泥质灰岩最多(54%),次为灰质泥岩(22%)、泥岩(12%)、灰岩(11%),其中泥质灰岩和灰质泥岩在纵向剖面上常互为过渡。

表 1 济阳坳陷沙三下-沙四上泥页岩矿物组成平均含量统计表
Table 1 Average mineral composition of Es₃-Es₄ mudstone in Jiyang depression

%

	层位	粘土矿物	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	菱铁矿	黄铁矿	硬石膏	磷质	泥质	粉砂
X 衍射全岩分析法	Es ₃	19	18	0.2	1	53	5	0.2	4	0.0			
	Es ₄	21	22	0.0	4	39	11	0.3	3	0.5			
薄片鉴定法	Es ₃					50	4	0.4	4	0.0	0.07	36	5
	Es ₄					40	9	0.0	3	1	0.01	44	3

1.2 结构特征

光学显微镜下观察,研究区沙三下和沙四上泥页岩泥质组分结构单一,基本为鳞片结构(图 3a~3k),因此岩石结构变化主要体现在碳酸盐矿物上。按照晶粒大小,碳酸盐矿物(以方解石为主)分为隐晶结构(图 3a、3b、3d~3f)和显晶结构(图 3g~3o)两类,后者包括显微晶(图 3g)、微晶(图 3h)、细-中晶(图 3i)结构等。按照晶粒形态,方解石分为粒状(图 3a~3i、3m、3n)和柱状(图 3j~3l、3o)两类,前者粒度越粗则重结晶作用越强,主要呈纹层状产出(图 3a、3b、3d、3g~3i、3m、3n);柱状方解石多垂直层理并顺层脉状产出(图 3l),少量呈低角度脉状产出,为充填成因(王冠民等,2005)。粒状方解石重结晶和方解石脉状充填均受成岩作用控制。

统计表明,研究区泥页岩方解石矿物以隐晶结构为主,其次为显微晶结构;相应地,岩石类型以隐晶灰岩为主,且显微晶灰岩常与隐晶灰岩呈过渡状态。

1.3 构造特征

岩心观察研究区沙三下和沙四上泥页岩普遍发育水平纹理(图 3),由矿物成分、颜色和纹层厚度变化显现。根据岩心和薄片镜下鉴定结果,将泥页岩构造类型分为纹层状、层状和块状 3 类,并以层状和纹层状构造为主,块状构造仅局部发育。岩心观察,纹层状构造纹理清晰,纹层均匀有序;层状构造层理模糊,纹层无序且变化较大;块状构造无层理。显微

镜观察,纹层状构造泥质、灰质纹层交互,且较规则,连续延伸;层状构造灰质、泥质多分别呈透镜状、条带状不连续延伸,或泥质与灰质相混但泥质、炭质、生物碎片等顺层定向排列;块状构造无明显定向组构。

据镜下观察,纹层类型多样(图 3e~3f 除外),成分主要为泥质纹层、灰质纹层、泥质和灰质较均匀混合纹层(图 3d)和富有机质泥质纹层,偶见砂质纹层,其中灰质纹层又可分为隐晶方解石纹层、亮晶方解石纹层。纹层厚度不一,纹层状构造的纹层厚度多在 1 mm 以下,一般厚度在 0.02~0.20 mm 之间,甚至可薄至<0.01 mm,呈平直或微波状。块状构造者多为灰质和泥质相混(图 3f),总体成层性较差,组分和结构不显层理构造。层状构造者(图 3e)介于纹层状或块状构造之间,相邻层成分差异较小,层理发育程度较差。

2 岩石成因相划分

济阳坳陷沙三下和沙四上泥页岩总体是一套暗色湖相沉积,成分组成及沉积特征受控于陆源输入、古气候及水动力条件等,沉积后埋藏成岩作用对其结构和构造特征进行改造,因此泥页岩成因相分析主要从沉积和成岩两方面进行讨论。

2.1 岩石主要组分成因

济阳坳陷沙三下和沙四上泥页岩主要成分为以

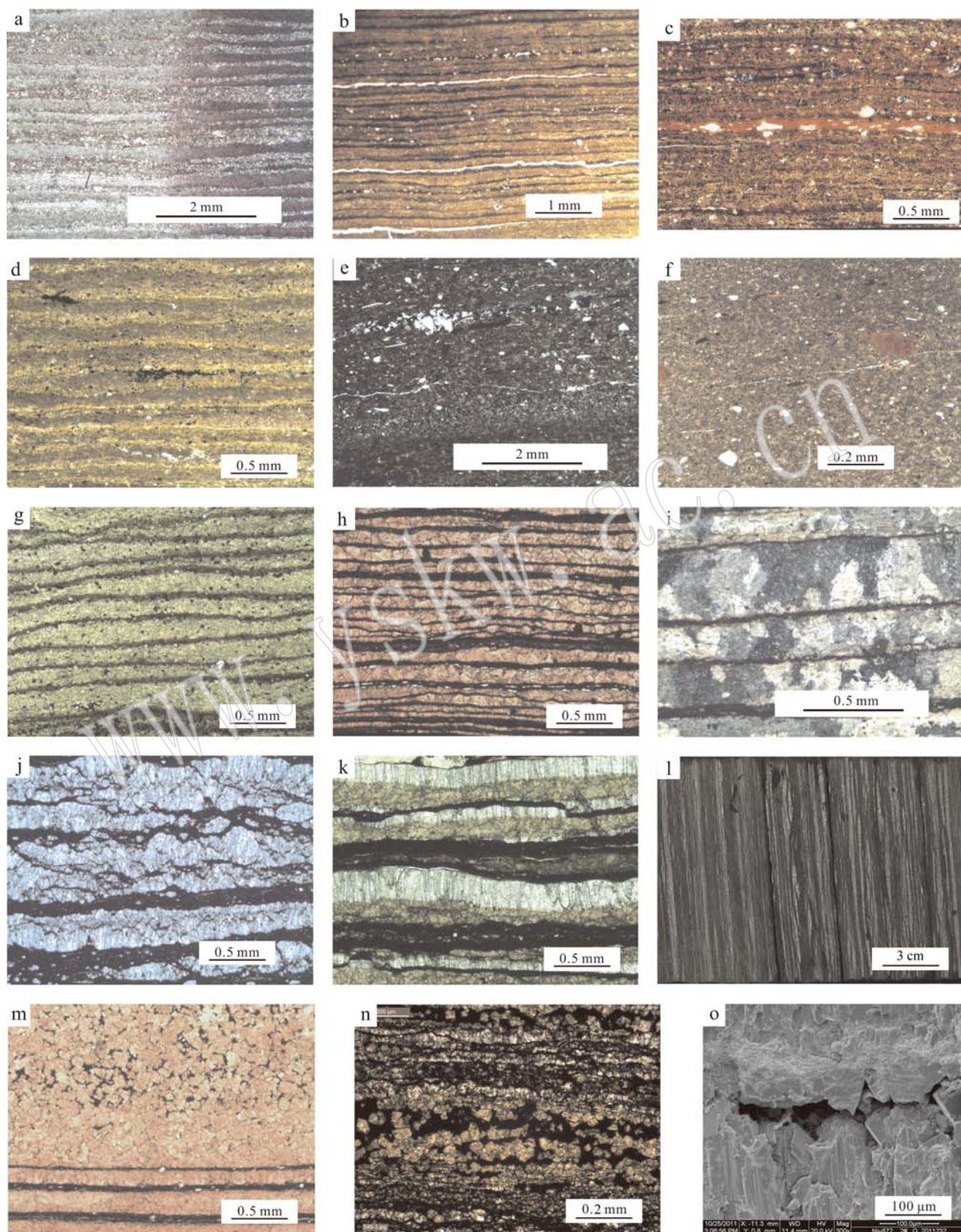


图 3 济阳坳陷沙三下-沙四上泥页岩代表性照片

Fig. 3 Photographs of Es₃-Es₄ mudstone in Jiyang depression

a—利页 1, 3 826.83 m, Es_4^4 , 纹层状泥质灰岩, 隐晶方解石纹层与泥质纹层互层, 单偏光; b—河 97, 3 182.45 m, Es_3^3 , 纹层状泥岩, 黄褐色泥质纹层与黑褐色泥质纹层互层, 单偏光; c—牛 38, 3 361.53 m, Es_3^3 , 纹层状泥岩, 褐色富有机质泥质纹层与黑褐色泥质纹层互层, 单偏光; d—面 4-5-16, 1 364.04 m, Es_4^4 , 纹层状泥质灰岩, 泥灰质纹层与泥质纹层互层, 单偏光; e—新义深 9, 3 376.00 m, Es_3^3 , 层状灰质泥岩, 隐晶方解石与泥质较均匀相混, 单偏光; f—罗 69, 2 933.87 m, Es_3^3 , 块状灰质泥岩, 隐晶方解石与泥质较均匀相混, 见粉砂及碳屑, 单偏光; g—牛页 1, 3 446.55 m, Es_4^4 , 纹层状泥质灰岩, 显微晶方解石与泥质纹层互层, 单偏光; h—牛页 1, 3 464.89 m, Es_4^4 , 纹层状泥质灰岩, 微晶方解石纹层与黑色富有机质粘土纹层互层, 单偏光; i—樊 120, 3 274.00 m, Es_4^4 , 纹层状灰岩, 细晶方解石纹层与富有机质泥质纹层互层, 正交偏光; j—罗 69, 3 061.35 m, Es_3^3 , 纹层状泥质灰岩, 显微-细晶方解石纹层与富有机质纹层互层, 单偏光; k—牛页 1, 3 459.65 m, Es_4^4 , 层状灰质泥岩, 柱状方解石纹层、显微晶方解石纹层与富有机质纹层互层, 单偏光; l—牛页 1, 3 296.20 m, Es_3^3 , 层状泥质灰岩, 柱状方解石脉及透镜体, 岩心磨光面; m—牛页 1, 3 464.35 m, Es_4^4 , 纹层状灰岩, 重结晶方解石晶间孔见沥青, 单偏光; n—罗 69, 3 055.60 m, Es_3^3 , 纹层状含泥质灰岩, 重结晶方解石晶间孔见沥青, 单偏光; o—牛 872, 3 206.00 m, Es_3^3 , 纹层状泥质灰岩, 柱状方解石脉晶间孔缝, 扫描电镜; a~f—沉积主控型成因相; g~i、m~n—沉积-成岩双控型成因相; j~l、o—成岩主控型成因相

a—LY1, 3 826.83 m, Es_4^4 , laminated argillaceous limestone, plainlight; b—H97, 3 182.45 m, Es_3^3 , laminated mudstone, plainlight; c—N38, 3 361.53 m, Es_3^3 , laminated mudstone, plainlight; d—Mian4-5-16, 1 364.04 m, Es_4^4 , laminated argillaceous limestone, plainlight; e—XYS9, 3 376.00 m, Es_3^3 , bedded calcareous mudstone, plainlight; f—L69, 2 933.87 m, Es_3^3 , massive calcareous mudstone, plainlight; g—NY1, 3 446.55 m, Es_4^4 , laminated argillaceous limestone, plainlight; h—NY1, 3 464.89 m, Es_4^4 , laminated argillaceous limestone, plainlight; i—F120, 3 274.00 m, Es_4^4 , laminated limestone, crossed nicols; j—L69, 3 061.35 m, Es_3^3 , laminated argillaceous limestone, plainlight; k—NY1, 3 459.65 m, Es_4^4 , laminated calcareous mudstone, plainlight; l—NY1, 3 296.20 m, Es_3^3 , laminated argillaceous limestone, polished core; m—NY1, 3 464.35 m, Es_4^4 , laminated limestone, plainlight; n—L69, 3 055.60 m, Es_3^3 , laminated argillaceous limestone, plainlight; o—N872, 3 206.00 m, Es_3^3 , laminated argillaceous limestone, SEM; a~f—sedimentation-controlled type; g~i, m~n—sedimentation and diagenesis-controlled type; j~l, o—diagenesis-controlled type

方解石为代表的碳酸盐和以粘土矿物、泥级碎屑为主的泥质组分,形成的主要岩石类型相应以灰岩类和泥岩类为主,二者之间常常彼此过渡。

2.1.1 方解石成因

方解石分为隐晶结构和显晶结构,对应形成隐晶灰岩和显晶灰岩,并以前者为主,为原生成因。关于方解石成因前人做了大量研究,目前国内外众多沉积学者和生物学者研究表明,大多数碳酸盐岩的形成或多或少地受到生物作用的影响(贾振远等, 1989;汪品先, 1993)。研究区沙三下和沙四上亚段沉积期具有热带亚热带半潮湿及干湿相间的气候条件(王冠民, 2005),沉积区周围出露大量古生界碳酸盐岩母岩,为沉积区提供了丰富的钙质基础(姜秀芳, 2011),藻类勃发诱发了碳酸盐沉淀(Anderson *et al.*, 1988; Stiller and Neeenbauma, 1999; 刘传联等, 2001b; 王冠民, 2005)。

显晶方解石粒度大小不一,以显微晶和微晶结构为主,少部分具中、细晶结构。显晶方解石是细小方解石晶粒经重结晶作用集成较大晶粒的结果。据前人研究,方解石结晶程度、结晶形态与有机质含量有密切关系(王冠民等, 2005; 姜在兴等, 2014)。

2.1.2 泥质组分成因

泥质组分包括粘土矿物和泥级石英、长石等碎屑,这些碎屑常以混合状态产出,主要为母岩区风化

产物经水流搬运并沉积形成,纯化学沉淀及成岩自生粘土矿物很少。泥岩中常含少量粉砂,产状以散布为主,成分除石英、长石外,可见少量白云石、方解石碎屑及白云岩屑等。

2.2 构造特征成因分析

2.2.1 纹层状构造成因

纹层状构造系水平层理构造,纹层组合主要有3种:方解石纹层+富有机质泥质纹层(图 3a、3g~3k)、泥质纹层+有机质纹层(图 3b、3c)、泥-灰纹层+泥质纹层(图 3d)。

沉积期渤海湾盆地处于热带亚热带,气候半潮湿及干湿相间,夏秋季节雨量充沛,粘土和粉砂等细颗粒物远岸悬浮沉积,形成泥质纹层;冬春季节气候相对干旱,陆源物质供应匮乏,蒸发量大;春季温度上升快,湖底静水层的冷水被带到湖面迅速升温,二氧化碳压力降低,藻类勃发也会消耗大量二氧化碳,水体中碳酸钙浓度过饱和,从而沉积方解石形成灰质纹层,因此二氧化碳压力是控制碳酸钙沉淀的最重要控制因素(王冠民, 2005; 朱筱敏, 2010)。这种泥质与灰质沉积交替分明、沉积物质完全为周期性供给的沉积特征(图 3a),反映的是季节纹层成因,岩心观察现象为典型的明暗相间的纹层状构造,浅色纹层对应方解石纹层,暗色纹层对应泥质纹层。

泥质纹层和有机质纹层组成的岩石颜色灰黑,

岩心观察纹层构造不清晰,镜下观察纹层细密(图 3b、3c),陆源碎屑供应不足,有机质主要为夏季沉积,泥质层主要为冬季悬浮沉积。

泥-灰纹层和泥质纹层组成的岩石碳酸盐含量高,岩心颜色浅;镜下观察(图 3d)方解石与泥质较均匀相混共同构成泥-灰纹层,层面常常不平整,泥质纹层厚度薄,连续性略差。

另外,纹层状构造岩石中常见薄壳介形虫碎片顺层分布。综上,研究区沙三下-沙四上泥页岩系是在远岸底栖生物扰动不强弱的弱动力静水环境下、以悬浮和(生物)化学方式沉积形成的半深湖-深湖相产物。

2.2.2 层状构造成因

层状构造与平行层理构造相似,不同之处在于泥质和灰质常相混合,纹层构造不清晰(图 3e),说明沉积物非随季节周期性供给,而是水平方向搬运沉积与(生物)化学沉积同时产生。扁平透镜状、条带状、不连续纹层状,甚至是粉砂屑状分布,以及灰质纹层的侵蚀、微型交错层理等表明灰质纹层沉积后经受了较强能量水体改造。完整介形虫及其较厚壳体、较多的极细砂,也反映所处水体具有相对较强的牵引流搬运能力。以上特征表明层状构造在形成过程中,机械搬运和(生物)化学沉积同时进行,沉积速率较快,沉积物非季节周期性供给,且有水流或波浪的能量变化;纹层侵蚀改造表明沉积环境水体具有一定能量,能够产生底流冲刷。相对于纹层状构造,层状构造形成的水体较浅,属接近浅湖的半深湖沉积。

2.2.3 块状构造成因

泥质或泥灰质没有分异,介形虫碎片、炭片等未很好顺层排列甚至分布杂乱,不显定向层理(图 3f),表明沉积物堆积速度快,为浊流悬浮沉积或三角洲泥沉积。

2.3 成岩相分析

研究区泥页岩成岩作用结果主要表现为碳酸盐矿物重结晶、柱状方解石脉状充填及伊/蒙混层矿物向伊利石的转化。

重结晶作用是碳酸盐在富含有机酸地层流体中溶解再沉淀的结果,重结晶晶粒在镜下观察有由小变大的过程,晶粒大小可能与有机质类型和演化程度有关;柱状方解石脉状充填可能为富含有机质源岩在演化过程中随超压产生沿纹理缓慢开裂、方解石不断沿垂直层理方向生长形成的(王冠民等, 2005);随着埋深和温度的增加,泥页岩中伊/蒙混层会脱水并吸收地层矿化水中的钾离子而向伊利石转

化(王朴等, 2008)。

根据方解石重结晶程度、柱状方解石脉状产出发育程度、伊/蒙混层与伊利石的相对组成,可将研究区沙三下和沙四上泥页岩成岩相划分为 5 类(表 2):碳酸盐弱重结晶成岩相、碳酸盐强重结晶成岩相、成岩缝充填成岩相、伊蒙混层成岩相和伊利石成岩相。在实际剖面中,不同成岩相之间常常相互过渡(表 3),总体上随着埋深增大,成岩作用增强,伊/蒙混层相过渡为伊利石相,方解石重结晶程度变强,但柱状方解石层分布不均,局部层段发育或富集。

表 2 济阳坳陷沙三下-沙四上泥页岩成岩相类型
Table 2 Diagenesis facies identification of Es₃-Es₄ mudstone in Jiyang depression

成岩相类型	主要特征	成因
弱重结晶成岩相	方解石呈粒状隐晶结构	重结晶作用
强重结晶成岩相	方解石呈粒状显晶结构	重结晶作用
成岩缝充填成岩相	方解石柱状/柱纤状显晶结构	成岩缝充填
伊蒙混层成岩相	伊利石含量 < 50 %	成岩转化
伊利石成岩相	伊利石含量 ≥ 80 %	成岩转化

2.4 成因相综合划分

综合以上成分成因分析、构造类型成因分析及成岩相分析,认为研究区沙三下和沙四上泥页岩总体特征首先受控于沉积作用,成岩作用的改造则有鲜明的特征,二者相互作用使得岩石差异性主要表现在粘土矿物组成、方解石结构和构造类型上。粘土矿物转化主要受埋藏成岩作用的影响,因此在剖面上呈现单向变化特征,即随层位变老,伊/蒙混层矿物向伊利石转化程度增加,但是粘土矿物类型在偏光显微镜下难以辨识具体种类,因此在岩心观察及薄片鉴定尺度对粘土矿物成岩相的识别难度较大;而碳酸盐矿物在本区分布广泛,脉状方解石充填产状在岩心观察尺度易于识别,方解石重结晶特点在偏光显微镜下易于识别,因此本文重点突出方解石成岩变化特征,结合构造特征和岩石类型,将研究区沙三下和沙四上泥页岩划分为沉积主控型、沉积-成岩双控型及成岩主控型三大成因相(表 4、图 3)。

2.4.1 沉积主控型成因相

岩石结构、构造特征主要反映沉积期的特点,成岩改造特征不明显。镜下观察,方解石呈隐晶结构,纹层状、层状产出,或与泥质相混呈纹层状或层状产出;泥质鳞片结构,与泥级碎屑或隐晶方解石相混;含少量粉砂、黄铁矿、介形虫碎片、炭屑等。此类成因相分布最为广泛,岩性多样(图 3a~3f)。

表 3 济阳坳陷沙三下-沙四上泥页岩不同地区成岩相纵向分布

Table 3 Vertical distribution of diagenesis facies of Es₃^x-Es₄^s mudrocks in Jiyang Depression

地区	层位	厚度/m	岩相	成岩相	
				碳酸盐特征	粘土矿物特征
罗家地区	Es ₃ ^x	23	层状灰质泥岩	强-弱重结晶	伊蒙混层
		89	层状泥质灰岩		
		28	纹层状泥质灰岩	强重结晶, 成岩缝充填	
		46	层状/纹层状泥质灰岩		
		17	层状/纹层状泥质灰岩		
樊家地区	Es ₃ ^x	50	层状灰质泥岩	弱重结晶	伊蒙混层
		39	层状灰质泥岩/泥质灰岩		
		20	层状/块状灰质泥岩	强-弱重结晶	伊利石
		20	纹层状灰质泥岩		
		43	纹层状泥质灰岩		
		24	层状灰质泥岩/泥质灰岩		
	Es ₄ ^s	24	纹层状泥质灰岩	弱重结晶	
		17	层状泥质灰岩		
		33	层状灰质泥岩/泥质灰(云)岩		
		12	层状灰质泥岩/泥岩	强-弱重结晶,可见成岩缝充填	
		38	纹层状云灰质泥岩/泥质灰岩		
		19	纹层状泥质云灰岩/泥岩	强重结晶,可见成岩缝充填	
		9	纹层状泥质灰岩		
		6	纹层状泥质云灰岩/灰云质泥岩		
		29	纹层状泥质灰岩/泥质灰云岩		
牛庄地区	Es ₄ ^s	40	层状/纹层状泥质灰岩	弱重结晶	伊蒙混层-伊利石
		12	层状灰质泥岩		
		21	纹层状灰质泥岩		
		46	纹层状泥质灰岩/灰质泥岩	强重结晶 成岩缝充填	
		32	纹层状泥质云灰岩		
		6	块状泥岩	强-弱重结晶	伊利石
		25	纹层状泥质白云岩/云质泥岩		

注：“/”表示互层。

2.4.2 沉积-成岩双控型成因相

岩石呈纹层状构造,纹层颜色差异大,岩心观察即可见“明暗相间”特征。镜下观察方解石呈粒状,不同程度重结晶;粒状方解石与泥质纹层互层产出(图 3g~3i),其中泥质纹层有机质含量较高,方解石纹层平直,分布、疏密较均匀;继承季节性沉积纹层特点,厚度较窄,一般在 0.10~0.30 mm 之间;方解石粒度有由细到粗的变化。重结晶方解石常见包含沉积杂质(单偏光镜下颜色偏黄)、残余早期细粒结构,表明经历了重结晶或多期重结晶成岩作用。

2.4.3 成岩主控型成因相

特指方解石脉状充填成因相,这些“方解石脉”主要顺层产出,局部见低角度产状,宽度从 1 mm 到

20 mm 之间;另常见柱状方解石透镜体受层理限制而总体顺层分布。镜下观察,方解石呈柱状和柱纤状结构,内部可见支离破碎的沉积纹层(图 3j),推测为泥页岩生烃超压破裂后富含碳酸钙的矿化水充填其中,方解石沉淀、结晶、生长并使破裂的沉积纹层再度变形所致;方解石纹层分布与泥质纹层互层性差,但多平行层理产出,并可与粒状方解石纹层共生(图 3k),宽度范围较大,窄者小于 0.05 mm,宽者可达 10 mm 以上,相对透亮干净。据何镜宇等(1986)研究,在纵向张力牵引和横向压力作用下,方解石可垂直层理生长成柱状,支持柱状方解石为后期充填岩石生烃增压而形成的破裂缝成因的观点。

表 4 济阳坳陷沙三下-沙四上泥页岩成因相划分

Table 4 Genetic facies classification for Es₃^x-Es₄^s mudstone in Jiyang depression

成因相	岩相	显微镜下主要特征描述	成因分析
沉积主控型	纹层状灰质泥岩 纹层状泥质灰岩	富含有机质泥质纹层与隐晶灰质纹层互层, 含少量粉砂、黄铁矿、介形虫碎片、炭屑等	季节性悬浮和(生物)化学交替沉积, 半深湖-深湖静水环境
	层状灰质泥岩 层状泥质灰岩	泥质与灰质相混或多呈透镜状、条带状、不连续纹层状, 介形虫碎片、炭屑等顺层排列	机械与(生物)化学沉积同时进行, 半深湖较动荡环境
	纹层状泥岩	不同有机质丰度泥质纹层互层, 少量粉砂、黄铁矿、介形虫碎片、炭屑等	季节性悬浮沉积, 深湖静水环境
	纹层状灰岩	隐晶灰质纹层与泥质纹层互层, 泥质纹层呈线状	季节性悬浮和化学交替沉积, 半深湖静水环境
	块状灰质泥岩	泥质混含灰质, 结构均匀, 无明显定向组构, 粉砂、介形虫碎片等半定向或杂乱分布	半深-深湖浊积、三角洲泥
沉积-成岩双控型	纹层状灰质泥岩 纹层状泥质灰岩	富含有机质泥质纹层与显晶灰质纹层互层	继承沉积纹层, 成岩作用强化层间差异
成岩主控型	纹层状灰质泥岩 纹层状泥质灰岩 层状灰质泥岩 层状泥质灰岩	隐晶或显晶灰质纹层与泥质纹层互层, 柱状方解石垂直层理脉状、透镜状产出	继承沉积构造, 成岩作用改造
	纹层状泥岩	不同有机质丰度泥质纹层互层, 柱状方解石垂直层理脉状、透镜状产出	继承沉积构造, 成岩作用改造

3 成因相划分的油气地质意义

济阳坳陷勘探实践及研究表明, 页岩油气和纹层状岩相关系密切(张善文等 2012; 赵铭海等, 2012; 王永诗等, 2013a, 2013b; Hao *et al.*, 2014), 因此在岩石学特征研究基础上进行成因相划分对于页岩油气分类评价及甜点预测具有重要指导意义。

3.1 成因相与页岩油气显示分布

济阳坳陷在 30 余口探井的泥页岩发育段获得了工业油气流, 主要分布在沾化和东营凹陷, 主要层系为沙四段上亚段和沙三段下亚段(张善文等, 2012)。随着勘探工作的细化, 发现页岩油气显示和工业油气流产出井段层位主要为沙四段上亚段 2 层组和沙三段下亚段 3 层组, 牛页 1 等井岩心观察发现, 这两个层组以发育成岩主控的柱状方解石脉或透镜体为特征(图 3l)。

3.2 成因相与储集空间类型

页岩油气工业油流井测井曲线分析发现, 这些层段测井响应表现为高伽马、高电阻率、声波曲线与电阻率曲线交叉叠合面积较大, 反映岩石孔隙度高、含油性好、可动油气相对含量高(赵铭海等, 2012)。镜下观察对应层段的岩心, 方解石重结晶现象明显,

晶间孔内常见沥青质储存(Hao *et al.*, 2014)(图 3m、3n), 最大孔径可达 0.1 mm; 方解石重结晶段常见柱状方解石脉产出, 脉与层理间常见裂缝型孔隙, 最大孔径约 0.1 mm(图 3o); 柱状方解石晶间缝常见黄色荧光, 说明是烃类储集空间或运移通道, 这些垂直层理的微孔缝沟通上下层的基质微孔即可形成网络状储集空间(Hao *et al.*, 2014)。

3.3 成因相与源岩条件

有机碳含量是源岩质量评级的重要指标, 也是北美地区页岩油气评价的重要指标。岩心观察, 柱状方解石脉或透镜体常发育于暗色泥页岩段。以牛页 1 井为例, 岩心观察沙三下 3 层组、沙四纯上 2 层组和 3 层组上部方解石脉较发育; 据 198 块有机碳样品测试数据表明, 方解石脉发育段有机碳含量明显高于非发育段(表 5), 说明柱状方解石的成因与有机质关系密切。王冠民等(2005)研究有相似结论: 有机质含量高的页岩中纹层状方解石脉体相对发育(王冠民等, 2005)。综上, 成岩主控型成因相的判识对于优质源岩及页岩油气甜点预测具有重要参考意义。

3.4 成因相与可压性

页岩油气成功开采要求岩石必须具有一定脆性, 在压裂改造过程中能形成网状裂缝系统, 且裂缝系统在开采过程中能保持开启, 因此可压性是页岩油

表 5 牛页 1 有机碳测试结果统计表
Table 5 Content of measured TOC of Well NY1

项目	整个层组		方解石脉发育段	
	样品块数	有机碳范围 (均值)/%	样品块数	有机碳范围 (均值)/%
沙三下 3 层组	14	2.25~12.8 (6.74)	8	5.21~12.8 (8.85)
沙四上纯上 2 层组	66	1.35~11.40 (3.26)	3.26	2.29~7.28 (3.66)
沙四上纯上 3 层组	29	0.58~6.51 (2.53)	2.53	2.00~4.07 (3.38)

气评价的重要指标。济阳拗陷沙三下和沙四上泥页岩脆性矿物以方解石为主,其次为碎屑石英,矿物产状及成因均不同于北美地区页岩油气产层,岩石硬度低;成岩主控和沉积-成岩双控型成因相以纹层状构造为主,横向及纵向力学性质差异较大,因此济阳拗陷沙三下和沙四上泥页岩可压性必将呈现与北美地区不同的特征,压裂施工时必须考虑具体情况。

4 结论

济阳拗陷沙三下和沙四上泥页岩矿物组成变化多样,岩性复杂,总体上以富含碳酸盐矿物为特征;据岩石构造类型推断,这套泥页岩主要形成于半深湖-深湖环境,局部水体有扰动,浊流成因和三角洲泥岩沉积产物主要呈块状构造。

济阳拗陷沙三下和沙四上泥页岩最终面貌主要受控于沉积作用和成岩作用。矿物组成及构造类型主要反映沉积条件,方解石结晶形态及粒度变化主要受成岩作用控制;根据方解石成因及重结晶程度,结合岩石构造和岩性特征,研究区泥页岩划分为沉积主控型、沉积-成岩双控型及成岩主控型三大成因相。

沉积-成岩双控成因和成岩主控成因的纹层状泥质灰岩和灰质泥岩是济阳拗陷沙三下-沙四上页岩油气赋存的有利成因相,相对发育的重结晶方解石粒间孔缝是有效的油气储集空间。成分的特殊性及纵横向的力学非均质性使其可压性特征更为复杂。

致谢 感谢胜利油田分公司地质科学研究院相关人员为岩心分析化验付出的辛苦劳动,感谢宋国奇、王永诗等教授级高工的指导和课题组同仁的鼎力相助。

References

Anderson S, Balch W M and Holligan P M. 1988. White waters of the Gulf of Maine[J]. *Oceanography*, 11: 18~22.
Deng Hongwen and Qian Kai. 1993. *Sedimentary Geochemistry and En-*

vironment Analysis[M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1~154(in Chinese).
Hao Yunqing, Chen Fukun, Zhu Jingquan, *et al.* 2014. Reservoir space of the Es₃³-Es₄¹ shale in Dongying sag[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 24(4): 425~431.
Hao Yunqing, Xie Zhonghuai, Zhou Zili, *et al.* 2012. Discussion on multi-factors identification of mudstone and shale[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 19(6): 16~19(in Chinese).
He Jingyu and Yu Suyu. 1989. *Sedimentary Rocks*[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1~299(in Chinese).
Jiang Xiufang. 2011. Main controlling factors of lacustrine carbonate rock in Jiyang depression[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 18(6): 23~27(in Chinese).
Liu Chuanlian, Shu Xiaoxin and Liu Zhiwei. 2001a. Microcharacteristics of Paleogene lacustrine petroleum source rocks in Jiyang depression [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 19(2): 293~298(in Chinese).
Liu Chuanlian, Xu Jinli and Wang Pinxian. 2001b. Algal blooms: The primary mechanism in the formation of lacustrine petroleum source rocks[J]. *Geological Review*, 47(2): 207~210(in Chinese with English abstract).
Liu Huimin, Zhang Shoupeng, Wang Pu, *et al.* 2012. Lithologic characteristics of lower Es₃ shale in Luoia area, Zhanhua sag[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 19(6): 11~15(in Chinese).
Jia Zhenyuan and Li Zhiqi. 1989. *Sedimentary Facies and Environment of Carbonate Rocks*[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1~186(in Chinese).
Jiang Zaixing, Zhang Wenzhao, Liang Chao, *et al.* 2014. Characteristics and evaluation elements of shale oil reservoir[J]. *Acta Petroli Sinica*, 35(1): 184~196(in Chinese).
Stiller M and Neeenbauma A . 1999. A stable carbon isotope study of dissolved inorganic carbon in Hardwater Lake Kinneret (Sea of Galille)[J]. *South African Journal of Science*, 95(4) (download from EBSCO HOST, no pages).
Wang Guanmin. 2005. The Sedimentary Control to Mudstone and Shale of High-frequency Cycle by Paleoclimate Change[D]. A thesis submitted for the Degree of Doctorate at the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 1~131(in Chinese).
Wang Guanmin. 2012. Laminae combination and genetic classification of Eogene shale in Jiyang depression[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(3): 666~671(in Chinese).
Wang Guanmin, Ren Yongjun, Zhong Jianhua, *et al.* 2005. Genetic analysis on lamellar calcite veins in Paleogene black shale of the Jiyang depression [J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(6): 834~838(in Chinese with English abstract).
Wang Guanmin and Zhong Jianhua. 2004. A review and the prospects of the researches on sedimentary mechanism of lacustrine laminae[J].

- Acta Petrologica et Mineralogica, 23(1): 43~48(in Chinese with English abstract).
- Wang Pinxian. 1993. From Lithofacies-paleogeography to Paleogene paleolimnology-New method for research on terrigenous oil-bearing basin[A]. Wang Pinxian and Liu Chuanlian. Paleogene Paleolimnologic Methods for Research on Terrigenous Oil-bearing Basin[C]. Beijing: China Ocean Press(in Chinese with English abstract).
- Wang Pu, Wei Guangzhen, Xie Zhonghuai, *et al.* 2008. Pore distribution characteristics and evolution history of Tertiary sand bodies of different genetic types in Jiyang depression—Taking Gudong oilfield, Shengtuo oilfield and Dongxin oilfield as examples[J]. Petroleum Geology and Engineering, 22(1): 9~11(in Chinese).
- Wang Yongshi, Li Zheng, Gong Jianqiang *et al.* 2013b. Discussion on an evaluation method of shale oil and gas in Jiyang depression: a case study on Luojia area in Zhanhua sag[J]. Acta Petroli Sinica, 34(1): 83~91(in Chinese).
- Wang Yongshi, Wang Weiqing and Hao Yunqing. 2013a. Shale reservoir characteristics analysis of the Paleogene Shahejie Formation in Luojia area of Zhanhua sag, Jiyang depression[J]. Journal of Palaeogeography, 15(5): 657~662(in Chinese).
- Zhang Linye. 2008. The progress on the study of lacustrine source rock[J]. Petroleum Geology & Experiment, 30(6): 591~595(in Chinese).
- Zhang Linye, Li Zheng, Li Juyuan, *et al.* 2012. Feasibility analysis of existing recoverable oil and gas resource in the Palaeogene shale of Dongying depression[J]. Natural Gas Geoscience, 23(1): 1~13(in Chinese).
- Zhang Linye, Li Zheng, Zhu Rifang, *et al.* 2008. Resource potential of shale gas in Paleogene in Jiyang depression[J]. Natural Gas Industry, 28(5): 26~29(in Chinese).
- Zhang Linye, Xu Xingyou, Liu Qing, *et al.* 2011. Hydrocarbon formation and accumulation of the deep Palaeogene of the Jiyang depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 38(5): 530~537(in Chinese).
- Zhang Shanwen, Zhang Linye, Li Zheng, *et al.* 2012. Formation conditions of Paleogene shale oil and gas in Jiyang depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 19(6): 1~5(in Chinese).
- Zhao Minghai, Fu Aibing, Guan Li, *et al.* 2012. Logging evaluation method of shale oil and gas reservoir in Luojia area[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 19(6): 20~24(in Chinese).
- Zhu Xiaomin. 2010. Sedimentary Rocks[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1~484(in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献
- 邓宏文, 钱 凯. 1993. 沉积地球化学与环境分析[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1~154.
- 郝运轻, 谢忠怀, 周自立, 等. 2012. 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, 19(6): 16~19.
- 何镜宇, 余素玉. 1989. 沉积岩石学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 姜秀芳. 2011. 济阳坳陷湖相碳酸盐岩沉积主控因素[J]. 油气地质与采收率, 18(6): 23~27.
- 刘传联, 舒小辛, 刘志伟. 2001a. 济阳坳陷下第三系湖相生油岩的微观特征[J]. 沉积学报, 19(2): 293~298.
- 刘传联, 徐金鲤, 汪品先. 2001b. 藻类勃发——湖相油源岩形成的一种重要机制[J]. 地质论评, 47(2): 207~210.
- 刘惠民, 张守鹏, 王 朴, 等. 2012. 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, 19(6): 11~15.
- 贾振远, 李之琪. 1989. 碳酸盐岩沉积相和沉积环境[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 姜在兴, 张文昭, 梁 超, 等. 2014. 页岩油储层基本特征及评价要素[J]. 石油学报, 35(1): 184~196.
- 王冠民. 2005. 古气候变化对湖相高频旋回泥岩和页岩的沉积控制[D]. 中国科学院研究生院, 1~131.
- 王冠民. 2012. 济阳坳陷古近系页岩的纹层组合及成因分类[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 42(3): 666~671.
- 王冠民, 任拥军, 钟建华, 等. 2005. 济阳坳陷古近系黑色页岩中纹层状方解石脉的成因探讨[J]. 地质学报, 79(6): 834~838.
- 王冠民, 钟建华. 2004. 湖泊纹层的沉积机理研究评述与展望[J]. 岩石矿物学杂志, 23(1): 43~48.
- 汪品先. 1993. 从岩相古地理到古湖泊学——陆相含油盆地研究的新途径[A]. 汪品先, 刘传联. 含油盆地古湖泊学研究方法[C]. 北京: 海洋出版社.
- 王 朴, 魏广振, 谢忠怀, 等. 2008. 济阳坳陷第三系不同成因类型砂岩体孔隙分布特征及孔隙演化史[J]. 石油地质与工程, 22(1): 9~11.
- 王永诗, 王伟庆, 郝运轻. 2013b. 济阳坳陷沾化凹陷罗家地区古近系沙河街组页岩储集特征分析[J]. 古地理学报, 15(5): 657~662.
- 王永诗, 李 政, 巩建强, 等. 2013a. 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, 34(1): 83~91.
- 张林晔. 2008. 湖相烃源岩研究进展[J]. 石油实验地质, 30(6): 591~595.
- 张林晔, 李 政, 李钜源, 等. 2012. 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, 23(1): 1~13.
- 张林晔, 李 政, 朱日房, 等. 2008. 济阳坳陷古近系存在页岩气资源的可能性[J]. 天然气工业, 28(12): 26~29.
- 张林晔, 徐兴友, 刘 庆, 等. 2011. 济阳坳陷古近系深层成烃与成藏[J]. 石油勘探与开发, 38(5): 530~537.
- 张善文, 张林晔, 李 政, 等. 2012. 济阳坳陷古近系页岩油气形成条件[J]. 油气地质与采收率, 19(6): 1~5.
- 赵铭海, 傅爱兵, 关 丽, 等. 2012. 罗家地区页岩油气测井评价方法[J]. 油气地质与采收率, 19(6): 20~24.
- 朱筱敏. 2010. 沉积岩石学[M]. 北京: 石油工业出版社.