

https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.586



辽东湾地区主力烃源岩分布特征与主控因素

侯庆杰¹, 金强¹, 牛成民², 张如才², 程付启¹, 徐进军¹, 张方君¹

1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580

2. 中海石油(中国)有限公司天津分公司勘探开发研究院, 天津 300452

摘要: 利用辽东湾地区岩心、地化及测井资料, 全面评价和预测了烃源岩分布和特征, 解决了烃源岩评价标准不一、发育主控因素不明确的问题。其中, 东三段、沙一段和沙三段烃源岩均为该区主力烃源岩, 综合利用岩心及地化资料, 明确了烃源岩有机地球化学特征, 结合测井信息建立了各套烃源岩有机碳含量和热解烃的测井预测模型, 并预测了烃源岩的有机质丰度和类型平面分布特征; 基于区域构造和沉积背景分析, 归纳了辽东湾地区烃源岩发育的主控因素。结果表明, 烃源岩在平面及纵向分布上均有差异, 且构造沉降速率、古生产力大小和盐度值与烃源岩有机碳含量具有明显相关性。辽西和辽中凹陷共发育5个生烃中心, 辽中凹陷烃源岩整体优于辽西凹陷, 且由东北至西南方向, 烃源岩品质逐渐变差; 纵向上沙一段最优, 沙三段次之, 东三段最差; 构造沉降速率较快、古生产力较高及沉积水体盐度高导致的缺氧环境是辽东湾地区烃源岩发育的主控因素。

关键词: 湖泊相; 烃源岩; 测井特征; 古近系; 辽东湾地区; 石油地质。

中图分类号: P624

文章编号: 1000-2383(2018)06-2160-12

收稿日期: 2018-02-01

Distribution Characteristics and Main Controlling Factors of Main Hydrocarbon Source Rocks in Liaodong Bay Area

Hou Qingjie¹, Jin Qiang¹, Niu Chengmin², Zhang Rucai², Cheng Fuqi¹, Xu Jinjun¹, Zhang Fangjun¹

1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

2. Exploration and Development Research Institute, CNOOC Tianjin Company, Tianjin 300452, China

Abstract: This study focuses on the distribution and characteristics of hydrocarbon source rocks in Liaodong Bay area, and the related issues involving inconsistent evaluation standards and unclear development controlling factors, by using core, geochemistry and logging data. Firstly, the organic geochemical characteristics of main hydrocarbon source rocks in Dong-3, Sha-1 and Sha-3, are studied by the core and geochemistry data. Then the logging prediction model of organic carbon content and pyrolysed hydrocarbon is established with logging data to predict the plane distribution characteristics of hydrocarbon source rocks. Lastly, the main controlling factors of hydrocarbon source rocks are generalized on the basis of results of subsidence history, sedimentary background. The results show that the plane and vertical distributions of hydrocarbon source rocks are different; the tectonic subsidence rate, paleoproductivity, and salinity have correlation with organic carbon content. There are 5 hydrocarbon generation centers in Liaoxi and Liaozhong sags in the plane scale, and the quality of hydrocarbon source rocks in Liaozhong sag is better than that of Liaoxi sag, which gets increasingly worse from northeast to southwest. In vertical section, the hydrocarbon source rocks in Sha-1 is the best, good in Sha-3, but poor in Dong-3. It is found that the fast tectonic subsidence rate, high paleoproductivity and anaerobic environment caused by high salinity are the favorable factors for hydrocarbon source rock development in Liaodong Bay area.

Key words: lake facies; hydrocarbon source rock; logging characteristics; Paleogene; Liaodong Bay area; petroleum geology.

基金项目: 国家科技重大专项(No.2016ZX05006-007); 中国博士后科学基金(No.2016M602222).

作者简介: 侯庆杰(1987-), 男, 博士研究生, 主要从事油气地质和地球化学方面的研究工作. ORCID: 0000-0003-2705-8854.

E-mail: houqingjie87@163.com

引用格式: 侯庆杰, 金强, 牛成民, 等, 2018. 辽东湾地区主力烃源岩分布特征与主控因素. 地球科学, 43(6): 2160-2171.

烃源岩是形成大中型油气田的物质基础(张林晔等,2003;丁修建等,2015;陈宇航等,2016),自发现石油和天然气以来,烃源岩评价一直是学者们分析盆地或区带油气勘探前景的一项重要工作.与湖相沉积相关的油气资源占总资源量的 20% 以上,因此关于湖相烃源岩形成机制问题已受到学者们普遍关注(Carroll and Bohacs,1999;姜雪等,2010;黄雪峰等,2016).辽东湾探区位于渤海海域最北端,是渤海地区重要的油气产区 and 有利探区之一,最近几年由于地质认识的重要突破,相继发现了 JZ25-1S、JX1-1、LD5-2 和 LD6-2 等多个亿吨级油气田,为了解决油气来源及资源量计算等相关问题,需要对研究区烃源岩特征及发育控制因素进行系统研究.

经过多年的石油地质研究和勘探实践,研究人员证实了辽西和辽中两个凹陷为辽东湾地区油气最富集的探区,其古近系东三段、沙一段和沙三段发育了三套湖泊成因为主的烃源岩(姜雪等,2010).前人对东营组和沙河街组烃源岩的岩石学特征、有机地化特征、构造演化特征及发育环境等的研究已较为成熟(汤良杰等,2008;刘磊等,2015),但是对全套烃源岩平面分布差异及在平面和纵向上的发育控制因素认识并不深入,并且仅依靠典型井的钻井地化数据预测烃源岩平面分布横向连续性差,严重影响预测精度.本文利用钻井、录井和测井等信息,建立适用于研究区烃源岩测井预测模型来预测烃源岩分布,归纳烃源岩平面及纵向上的分布差异性,结合盆地构造演化特征、沉积背景及古生产力等资料,分析了辽东湾地区烃源岩发育的控制因素,进而为下一步油气勘探提供方向.

1 地质概况

辽东湾地区位于渤海湾盆地东北部,是下辽河裂谷盆地向渤海海域的自然延伸,属于发育在华北克拉通上的裂陷盆地,东西分别与胶辽隆起和燕山隆起相邻,南北与渤中坳陷和辽河断陷接壤,呈北东向长条状展布,近似长方形,面积约为 $2.6 \times 10^4 \text{ km}^2$.研究区构造格局见图 1,由东往西依次为辽东凹陷、辽东凸起、辽中凹陷、辽西凸起和辽西凹陷(图 1),呈现三凹两凸、凹凸相间的构造格局(蒋恕等,2007;李德江等,2007;徐长贵等,2009;田金强等,2011;姜雪等,2013;余一欣等,2014;杨宝林等,2014),其中辽中凹陷面积最大,辽西凹陷次之,辽东凹陷规模最小.

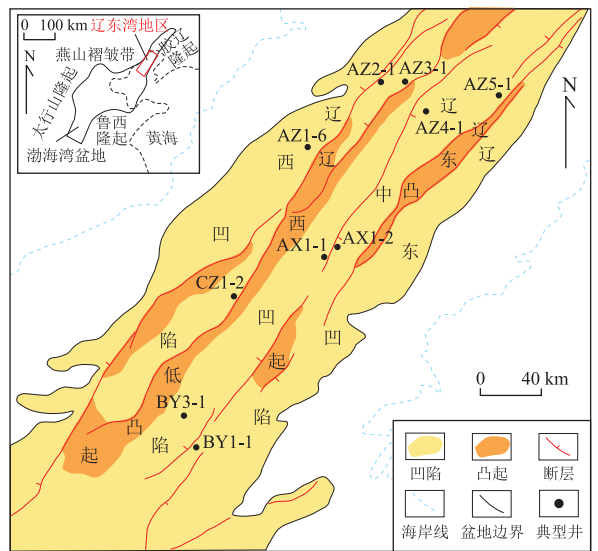


图 1 辽东湾地区构造格架

Fig.1 The tectonic framework of Liaodong Bay area

界	系	统	组	段	代号	岩性剖面	界面年龄 (Ma)	岩性特征	
									界
新	新近系	上新统	明化镇组	N _{2m}		[岩性剖面]	2.0	上段灰绿色、深红色泥岩与灰白色、棕黄色中细粒砂岩不等厚互层;下段为棕红色、紫红色、灰绿色泥岩夹灰绿色、深灰色粉细砂岩	
							5.1		
		中新统	馆陶组	N _{1g}		[岩性剖面]	12.0	灰白色厚层块状含砾砂岩、砾砂岩夹棕红色泥岩	
							24.6	灰白色厚层块状含砾砂岩、砾砂岩夹棕红色泥岩	
		古	渐新统	东营组	东一段	E ₃ d ¹	[岩性剖面]	27.4	灰、深灰、褐灰色泥岩夹薄层粉-细砂岩
					东二段	E ₃ d ²	[岩性剖面]	30.3	深灰色泥岩夹砂岩透镜体
					东三段	E ₃ d ³	[岩性剖面]	32.8	生物碎屑灰岩、碎屑云岩、深灰-黑色泥岩
				沙河街组	沙一段	E ₃ s ¹	[岩性剖面]	36.0	灰绿、灰褐色泥岩与中-粗砂岩互层
					沙二段	E ₃ s ²	[岩性剖面]	38.0	深灰、黑灰、灰褐色泥岩夹薄层砂岩
					沙三段	E ₃ s ³	[岩性剖面]	42.0	灰色灰岩、云岩与膏岩互层局部夹深灰-褐灰色泥岩;高部位为红色的粗碎屑砂岩,底部为砾岩
近	始新统	孔店组	E ₁₋₂ k		[岩性剖面]	50.5	灰、灰绿、红色泥岩夹云岩,条带灰岩		
						65.0			

图 2 渤海盆地新生代地层综合柱状图

Fig.2 Integrated histogram of Cenozoic strata in Bohai basin
据汤良杰等(2008)

辽东湾地区主要发育古近系和新近系,新近系发育馆陶组和明化镇组,以河流相沉积为主;古近系由孔店组(E₁₋₂k)、沙河街组(E₂s⁴-E₃s¹)和东营组(E₃d³-E₃d¹)组成(图 2),以湖泊和三角洲相沉积为主(加东辉等,2007;南山等,2013;王力群等,2013;

Wang *et al.*, 2014), 多年的石油地质研究和勘探实践表明, 该地区烃源岩主要发育在古近系东三段、沙一段和沙三段, 有机质丰度和类型总体较好, 生烃潜力较大, 是目前已经确定的烃源岩层位。

2 烃源岩特征

2.1 烃源岩有机地化特征

按照取心井尽量处于或者接近凹陷深处、样品数量多及各处区域均有分布的原则, 选取辽东湾地区典型井 10 口(图 3), 其中辽西凹陷典型井 4 口, 分别为位于中北部的 AZ2-1、AZ3-1 和 AZ1-6 井以及位于南部的 CZ1-2 井; 辽中凹陷典型井 6 口, 分别为位于北部的 AZ5-1 和 AZ4-1 井, 中部的 AX1-1 和 AX1-2 井以及位于南部的 BY3-1 和 BY1-1 井。利用典型井的地球化学信息来识别烃源岩有机地化特征。

有机碳含量(TOC)是有机质丰度最重要的指标之一, TOC 值越高, 烃源岩生烃能力越强(Le Doan *et al.*, 2013; Han *et al.*, 2014; Zhao *et al.*, 2015; 周翔等, 2016)。选取两个凹陷 10 口典型井中共 218 个 TOC 实测点统计发现, 沙一段烃源岩丰度最高, TOC 值大于 2% 的样点数超过 60%, 平均值高达 2.41%, 为优质烃源岩; 沙三段次之, TOC 样点值多处于 1%~4% 范围内, 平均值为 1.75%, 为中等—优质烃源岩; 东三段最差, TOC 样点值多小于 2%, 平均值为 1.23%, 整体为中等烃源岩。对于同一层位, 辽中凹陷烃源岩丰度整体优于辽西凹陷。

烃源岩有机质类型是决定其生烃能力的另一重要指标。不同干酪根类型的烃源岩, 生烃能力差别很大(Hakimi *et al.*, 2012; 曾花森等, 2013; 陈建平, 2014)。利用辽西凹陷和辽中凹陷 10 口典型井的 149 个热解实验样品和 89 个通过显微观察确定的干酪根显微组分分析数据, 采用烃源岩热解图版分

析法和干酪根显微组分分析法划分烃源岩的有机质类型(图 4 和图 5), 其中, 显微组分分析法采用 T 指数定量划分有机质类型, 其 T 指数计算公式为:

$$T = (100A + 50B - 75C - 100D) / 100, \quad (1)$$

式(1)中, A 、 B 、 C 、 D 分别为腐泥组、壳质组、镜质组和惰质组的含量, 单位为%。通过实测数据统计分析显示, 两个凹陷相同层位有机质类型相似, 其中东三段壳质组含量为 20%~92%, 腐泥组含量为 0%~20%, 镜质组+惰质组含量为 3%~71%, T 指数范围为 -19.2~48.3, 表明有机质类型以 II_2 型为主, 含少量 III 型和 II_1 型, 即有机质以偏陆源高等植物来源为主; 沙一段壳质组含量为 40%~93%, 腐泥组含量为 3%~58%, 镜质组+惰质组含量为 1%~20%, T 指数范围为 27.8~81.5, 表明有机质类型主要为 II_1-I 型, 含少量 II_2 型, 即有机质以偏低等水生生物来源为主; 沙三段壳质组含量为 48%~87%, 腐泥组含量为 3%~44%, 镜质组+惰质组含量为 5%~30%, T 指数范围为 11.5~62.5, 表明有机质类型主要为 II_1-II_2 型, 含少量 I 型, 反映有机质多为混合型来源。

有机质成熟度是表示沉积有机质向油气转化的热演化程度, 也是评价烃源岩最重要、最基本的参数之一, 镜质体反射率(R_o)是研究有机质成熟度关键指标之一(沈忠民等, 2009; 李志明等, 2013; 鲁雪松等, 2014)。对全区 82 口井测点数大于 30 的镜质体反射率数据统计(图 6), 两个凹陷的烃源岩热演化特征略有不同, 其中辽西凹陷的生油门限($R_o = 0.5\%$)约为 2 600 m, 在 3 360 m 处($R_o = 0.7\%$)进入中成熟阶段(大量生油阶段); 而辽中凹陷生油门限略深, 为 2 650 m 左右, 在 3 380 m 处达到中成熟阶段。结合辽东湾地区地震大连片资料, 认为东三段凹陷处烃源岩多为低成熟阶段($R_o = 0.5\% \sim 0.7\%$), 沙一段和沙三段凹陷处烃源岩多处于中成熟阶段,

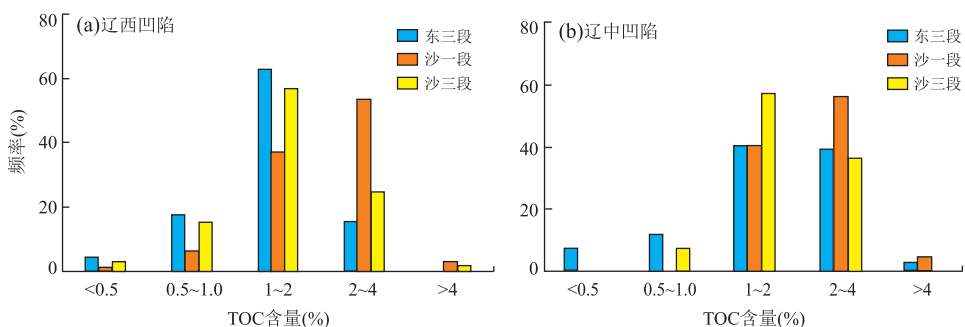


图 3 辽东湾地区古近系烃源岩有机碳(TOC)含量

Fig.3 The organic carbon content of Paleocene source rocks in Liaodong Bay area

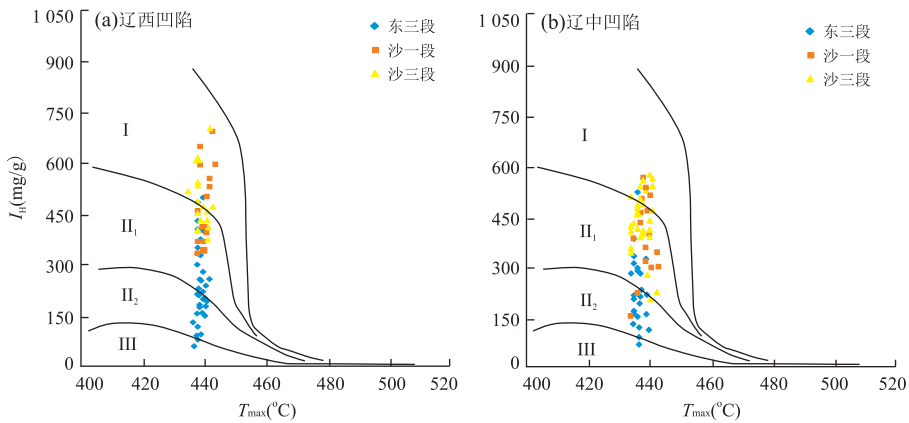


图 4 辽东湾地区古近系烃源岩有机质类型

Fig.4 The organic matter types of Paleogene source rocks in Liaodong Bay area

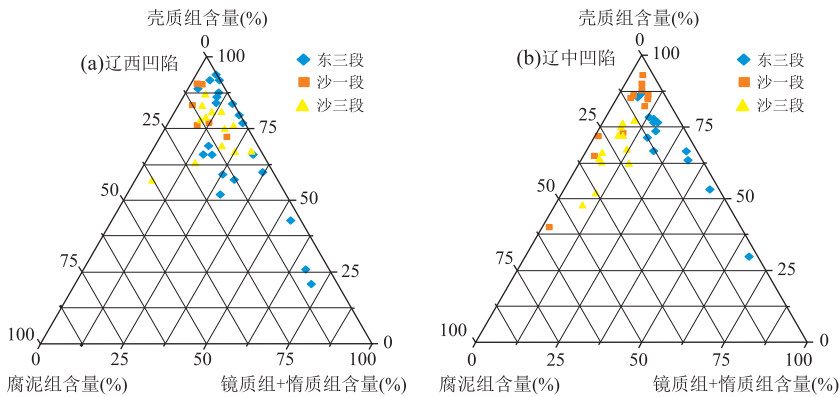


图 5 辽东湾地区古近系烃源岩干酪根显微组分

Fig.5 The kerogen macerals of Paleogene source rocks in Liaodong Bay area

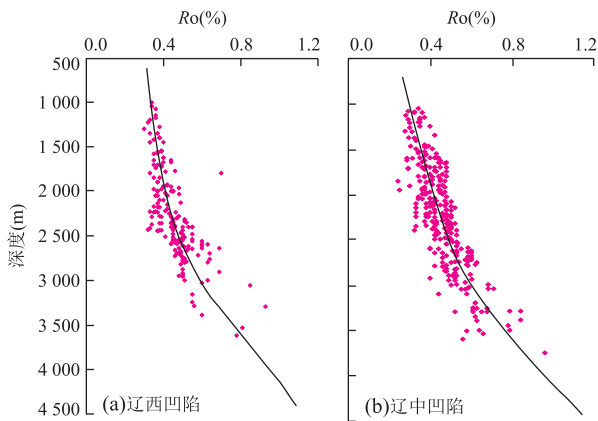


图 6 辽东湾地区古近系烃源岩镜质组反射率 R_o 剖面

Fig.6 Vitrinite reflectance R_o section of Paleogene source rocks in Liaodong Bay area

三层位烃源岩均已进入成熟生油气阶段。

2.2 烃源岩测井响应特征

随着近年来烃源岩非均质性的发现和研究,以往由于受到钻井取心和实验分析费用的限制,获得

连续的烃源岩相关参数很难,尤其是有机碳(TOC)含量和有机质类型值,常以有限的样品取其平均值来代表整套厚层烃源岩的特征.显然,平均值会掩盖有机质丰度高类型好或丰度低类型差的贡献或影响,因此计算出来的生烃量往往不准,得到的结论很可能误导勘探决策.测井信息可以间接地反映出地层的岩性及其流体等特征,部分测井曲线与烃源岩有机碳值及有机质类型值具有很强的相关性,因此,鉴于研究区 180 余口钻井丰富的测井资料,可尝试寻求建立一种准确定量的、易于操作的地化—测井预测模型,预测烃源岩的有机碳值和有机质类型,解决地化资料纵向及横向连续性差等问题,提高预测精度。

2.2.1 测井预测模型的建立 研究区共 42 口取心井,本次选取 10 口典型井 218 个样品的地化和测井资料(经标准化后),预测的地化参数包括烃源岩的有机碳含量(TOC)和热解烃(S_2),其中 TOC 值为有机质丰度的重要评价参数, S_2 值可以结合 TOC

表 1 烃源岩 TOC 测井预测模型

Table 1 The logging prediction models of organic carbon content of hydrocarbon source rocks

层段	TOC 测井预测模型
东三段	$TOC = 0.04AC + 3.65 \lg RT - 3.92$
沙一段	$TOC = 0.08AC + 5.04 \lg RT - 7.51$
沙三段	$TOC = 0.11AC + 3.27 \lg RT - 9.95$

表 2 烃源岩 S_2 测井预测模型Table 2 The logging prediction models of S_2 values of hydrocarbon source rocks

层段	S_2 测井预测模型
东三段	$S_2 = 0.91(TOC)^2 + 2.35 TOC - 0.29$
沙一段	$S_2 = 0.13(TOC)^2 + 6.32 TOC - 3.69$
沙三段	$S_2 = 0.54(TOC)^2 + 3.98 TOC - 0.99$

值及 T_{max} 值(通过深度求得)判断有机质类型(朱光有等, 2003)。

通过研究辽东湾地区烃源岩层位, 发现烃源岩的测井曲线体现为“三高一低”, 即高自然伽马(natural gamma ray, GR)、高声波时差(acoustic, AC)、高电阻率(true formation resistivity, RT)和低密度(density, DEN)。富含有机质和粘土矿物的烃源岩层具有较强的吸附性, 往往富含放射性元素, 从而导致该层段 GR 值偏高(>105 APD); 烃源岩层中的有机质和粘土矿物一般具有低体积密度和低速度的特点, 测井曲线上往往表现为高 AC ($>90 \mu s/ft$) 和低 DEN ($<2.5 g/cm^3$) 的特点; 成熟烃源岩层中的孔隙流体中具有液态烃, 导电性差, 因此体现为高 RT 的特征 ($RT > 2.8 \Omega \cdot m$)。本次采用 Passey *et al.* (1990) 提出的 TOC 定量测井评价技术, 优选电阻率和声波时差测井参数, 利用改进后的公式(张寒和朱光有, 2007)为:

$$TOC = a \cdot \lg RT + b \cdot AC + c, \quad (2)$$

式(2)中, a 、 b 、 c 均可通过对研究区系统采集样品分析, 采用最小二乘法拟合获得。由于东三段、沙一段和沙三段构造沉积环境具有明显的差异性, 因此需

要分别对 3 套烃源岩建立 TOC 测井预测模型, 其预测模型公式如表 1 所示。

干酪根类型的鉴定是烃源岩评价的重要内容, 利用氢指数 I_H 与热解峰峰顶温度 T_{max} 图版划分烃源岩有机质类型是快速定量分析烃源岩类型的有效方法, 此种方法需要氢指数 I_H 和 T_{max} 的值, 其中 T_{max} 可以通过深度求得, 而氢指数 I_H 可以通过下列公式求得:

$$I_H = S_2 / TOC \times 100, \quad (3)$$

其中: I_H 为氢指数, mg/g ; S_2 为热解烃, mg/g ; TOC 为有机碳含量, %。

目前, TOC 可以根据测井曲线获得连续的数据点, 如何求得连续性的 S_2 是需要解决的关键问题。经过研究发现, 研究区热解烃 S_2 与 TOC 之间有一定的关系, 而且对于同一层位, 两者关系更为显著。将已进行的热解和热模拟分析的样品分层位进行 S_2 和 TOC 值相关性分析(图 7), 发现 S_2 与 TOC 值呈二次正相关关系, 并建立东三段、沙一段和沙三中段的 S_2 测井预测模型公式(表 2), 回归系数 r^2 分别为 0.87、0.91 和 0.92。

2.2.2 准确性检验 将测井预测模型公式得到的烃源岩 TOC 和 S_2 值与钻井地化资料的实测值对比(表 3), 相对误差均在 18% 以内, 预测精度对盆地勘探部署提供较为准确的信息。

2.3 烃源岩平面分布特征

利用研究区 42 口取心井的 768 个样品实测数据和 180 余口钻井的测井资料, 结合该区域的构造沉积特征, 获得辽东湾地区古近系 3 个层段烃源岩的有机碳含量及有机质类型的平面分布图(图 8)。

整体上看, 辽西和辽中两个凹陷可以划分为 5 个生烃洼陷, 分别为辽西北一中洼、辽西南洼、辽中北洼、辽中中洼和辽中南洼; 其中辽西北一中洼和辽中北洼与下辽河断陷盆地相接, 辽中南洼通向渤中拗陷。同一洼陷不同层位烃源岩品质具有明显的差异性, 以辽中凹陷主要的生油气洼陷之一——辽中

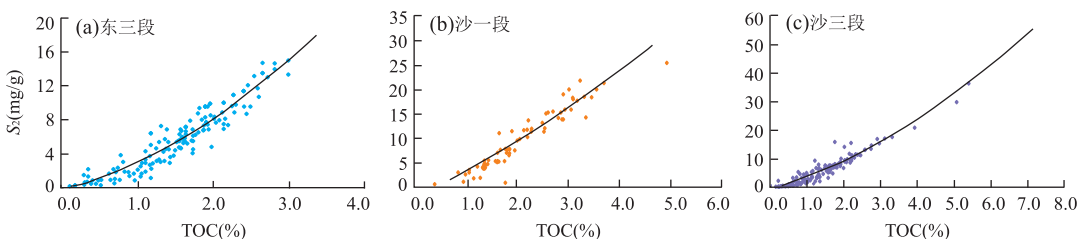
图 7 烃源岩 TOC 与 S_2 分析值散点图Fig.7 Scatter diagrams between TOC and S_2 values of hydrocarbon source rocks

表 3 烃源岩预测值与钻井实测值对比

Table 3 The comparison between predictive values and drilling measured values of hydrocarbon source rocks

井名	深度(m)	层位	有机碳含量 TOC 值			热解烃 S ₂		
			实测 TOC(%)	预测 TOC(%)	相对误差(%)	实测 S ₂ (mg/g)	预测 S ₂ (mg/g)	相对误差(%)
AZ1-4	2 550	东三段	2.02	2.17	7.43	8.13	9.09	11.81
AZ20-1	2 740	东三段	2.25	2.12	-5.78	9.77	8.78	-10.13
AZ17-1	2 650	东三段	0.58	0.61	5.17	1.39	1.48	6.08
AX1-2	2 600	东三段	1.18	1.39	17.80	4.99	4.73	-5.21
AD1-1	2 780	东三段	2.12	1.99	-6.13	7.52	7.99	6.25
AZ20-2	2 040	沙一段	1.63	1.42	-12.88	6.17	5.55	-10.05
AZ25-8	2 360	沙一段	2.77	2.95	6.49	18.26	16.09	-11.88
CZ1-7	2 400	沙一段	1.65	1.88	13.94	9.27	8.65	-6.69
BY1-1	3 200	沙一段	2.14	2.36	10.28	11.02	11.95	8.44
AX1-1	2 926	沙一段	2.60	2.55	-1.92	11.52	13.27	15.19
AZ2-4	2 440	沙三段	2.21	2.49	12.67	10.93	12.27	12.26
AZ23-1	3 000	沙三段	1.56	1.67	7.05	8.03	7.16	-10.83
AX1-2	3 100	沙三段	0.98	0.89	-9.18	3.16	2.98	-5.70
AZ25-2	2 880	沙三段	1.52	1.39	-8.55	4.96	5.59	12.70
BY1-1	3 002	沙三段	2.62	2.76	5.34	14.27	14.11	-1.12

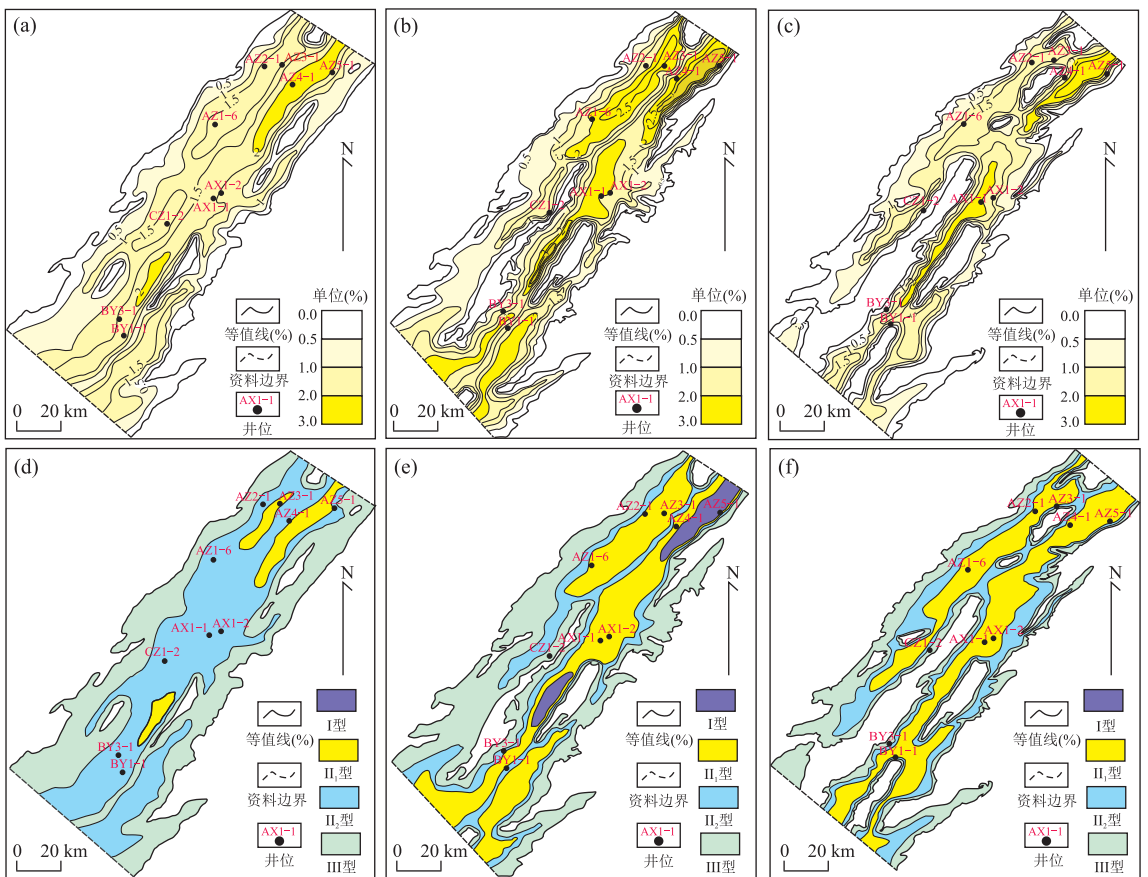


图 8 辽东湾地区古近系烃源岩 TOC 和有机质类型平面分布

Fig.8 The plane distribution of TOC and types of Paleogene source rocks in Liaodong Bay area

a.东三段烃源岩 TOC 值平面分布;b.沙一段烃源岩 TOC 值平面分布;c.沙三段烃源岩 TOC 值平面分布;d.东三段烃源岩有机质类型平面分布;e.沙一段烃源岩有机质类型平面分布;f.沙三段烃源岩有机质类型平面分布

中洼为例,沙一段烃源岩品质最优,有机碳含量为 1.5%~3.2%,有机质类型为 I 型和 II₁ 型;沙三段

烃源岩品质次之,有机碳含量为 1.5%~2.4%,有机质类型为 II₁ 型;东三段品质最差,有机碳含量为

1.0%~2.1%，有机质类型为Ⅱ₂型。同一层位不同洼陷烃源岩质量略有差异，以沙一段为例，辽中北洼和辽中中洼烃源岩品质均较好且无明显差异，有机碳含量为2.0%~3.7%，有机质类型以Ⅰ型和Ⅱ₁型为主；辽中南洼和辽西北一中洼烃源岩品质次之，有机碳含量1.5%~2.5%，有机质类型主要为Ⅱ₁型；辽西南洼烃源岩品质差于其他洼陷，有机碳含量为0.5%~1.5%，有机质类型Ⅱ₂型。总体而言，不同层位烃源岩，沙一段品质最好，沙三段次之，东三段最差，而对于同一层位烃源岩，辽中凹陷整体优于辽西凹陷，且由东北至西南方向，烃源岩品质逐渐变差。

3 有效烃源岩发育的主要控制因素

根据辽东湾地区的烃源岩地球化学特征及地化一测井资料预测的烃源岩平面分布特征，总结出辽东湾地区烃源岩发育的主控因素为构造沉降、古生产力和保存环境。其中，构造沉降可以从根本上控制沉积环境中沉积物的保存条件，古生产力和保存环境共同决定有机质类型和有机碳含量(魏恒飞等,2013)。

3.1 构造沉降

烃源岩的发育要有适宜的构造沉降条件和埋藏条件，如果没有足够的沉降量，那么沉积的有机质将被氧化分解，从而形成不了烃源岩。姜雪等(2010)通过回剥技术模拟了盆地沉降史，并计算出不同凹陷的构造沉降曲线(图9)。

研究区辽西和辽中两个生烃凹陷的沉降史相近，均经历了两次主要的构造沉降期。自沙三段时期开始的始新世中期的伸展张裂隙Ⅱ幕阶段，该阶段构造快速沉降；沙二—沙一时期沉降速率变慢，为第一裂后热沉降阶段；东三段—东二段时期沉降速率再次加快，为渐新世东营期走滑拉分与地幔和上下地壳的非均匀不连续伸展叠加的再次裂陷阶段。烃源岩层段的构造沉降速率对其有机质具有明显的控制作用，如辽中凹陷东三段的构造沉降速率高达167 m/Ma，其凹陷最深处平均 TOC 值可达到2.1%，而辽西凹陷东三段的构造沉降速率较小，为98 m/Ma，凹陷最深处平均 TOC 值仅为1.6%，显然始新世—渐新世的裂陷作用控制着辽西和辽中凹陷的构造沉降速率，进而控制着烃源岩的发育。

3.2 古生产力

3.2.1 沉积有机质的生物来源 地层中藻类的高含量通常被作为高生产力和湖盆水体发育的标志(朱光有和金强,2002;田杨等,2016)。干酪根显微组分不仅能反映有机质的类型，也能反映有机质的来源。壳质组和腐泥组是富氢显微组分、倾向于生油，而镜质体为贫氢显微组分、倾向于生气(林俊峰等,2015)。通过对研究区不同层位干酪根的显微组分分析(图5)，发现东三段、沙一段和沙三段烃源岩的腐泥组+壳质组含量多数大于50%，反映了低等水生生物，特别是藻类堆积物具有相当的贡献；沙一段烃源岩镜质组含量平均为5.2%，沙三段烃源岩镜质组

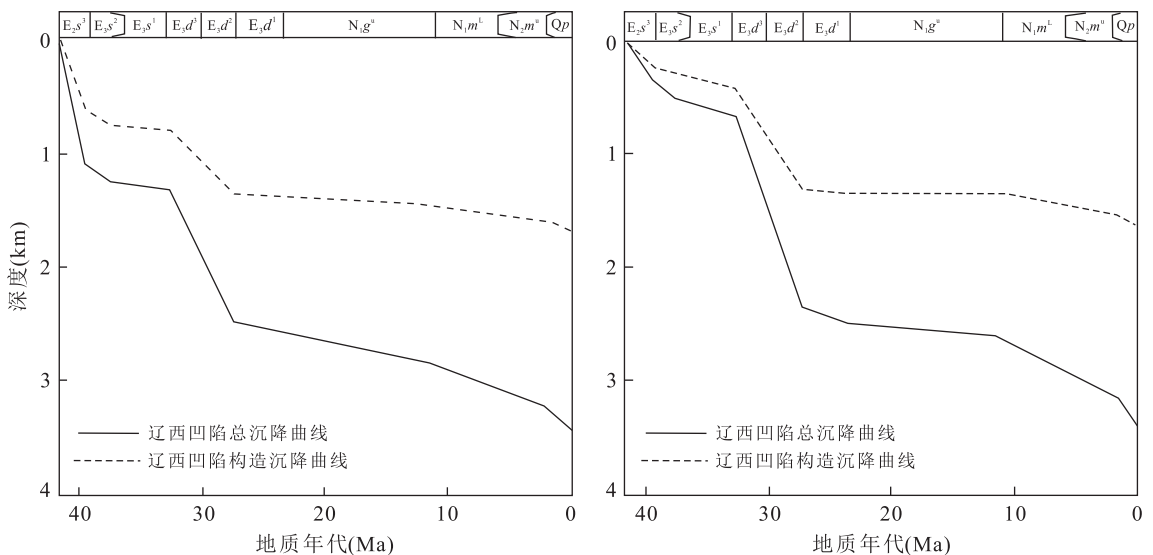


图9 辽东湾地区沉降史

Fig.9 Subsidence history diagrams of Liaodong Bay area

据姜雪等(2010)

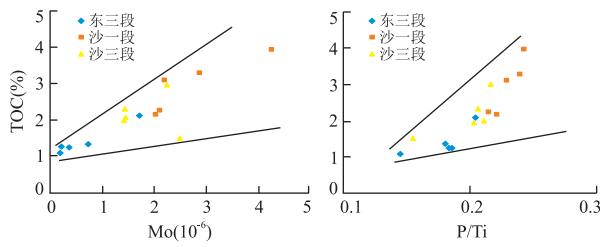


图 10 烃源岩 TOC-Mo 及 TOC-P/Ti

Fig.10 The correlation figures between TOC-Mo and TOC-P/Ti of source rocks

含量平均为 9.6%，而东三段烃源岩镜质组含量平均为 19.4%，明显较沙一和沙三段高，反映了东三段烃源岩具有较高的陆地高等植物贡献。通过对 3 个层位烃源岩分布特征研究(图 8)，烃源岩品质由好至差依次为沙一段、沙三段和东三段，这与腐泥组+壳质组含量变化趋势基本一致，暗示有机质的生物来源控制着烃源岩的发育。

3.2.2 元素地球化学指标 部分元素地球化学指标可以反映湖泊的初始生产力。Bostick *et al.* (2003)认为在沉积过程中，Mo 含量与有机碳的堆积速率近似成正比，且 Mo 受后期的变化影响较少，因此富有机质沉积物中的 Mo 含量可以作为湖泊生物古生产力参数，间接反映生产力的大小。Tyrrell (1999)讨论了氮、磷与初级生产力的关系，提出当水体中氮含量不足时，水生生物可以从空气中获得氮，但是却不能获得磷，因此湖泊中的磷可以直接指示生物的初始生产力；Murray *et al.* (2000)提出磷(P)和钛(Ti)含量比值可以反映古生产力的高低。笔者对典型井 15 个样品(图 10)研究得出烃源岩 TOC 值分别与 Mo 及 P/Ti 值有明显的正相关关系。沙一段 Mo 元素丰富，Mo 值为 $(2.1 \sim 4.3) \times 10^{-6}$ ；P/Ti 值高，在 0.21~0.24 范围内，对应的有机碳丰度为 2.2%~4.0%，且明显高于其他两段，说明了高的古生产力影响着辽东湾地区烃源岩的发育。

3.3 保存环境

当湖盆底部水体为缺氧还原条件时，降落到湖底的水生生物和陆源有机质才能被保存到沉积物中。缺氧环境是指水体中溶解氧含量低于 0.5 mL/L，除细菌外，其他生物(特别是底栖生物)不能生存，在这样环境中沉积下来的有机质才能保存(金强等, 2008)。在陆相湖盆中，水体由盐度和温度形成的分层作用可以导致缺氧环境的形成，其中咸化湖泊水体因密度形成上下盐度不一致，易形成稳定的分层(金强和查明, 2000)。微量元素变化能够反映古

表 4 元素地球化学指标的盐度指示意义

Table 4 Salinity fingerprint of the elemental geochemistry

沉积环境	B(10^{-6})	B/Ga	Sr/Ba
咸水	>100	>4	>1
半咸水	60~100	3~4	>1
淡水	<60	<3	<1

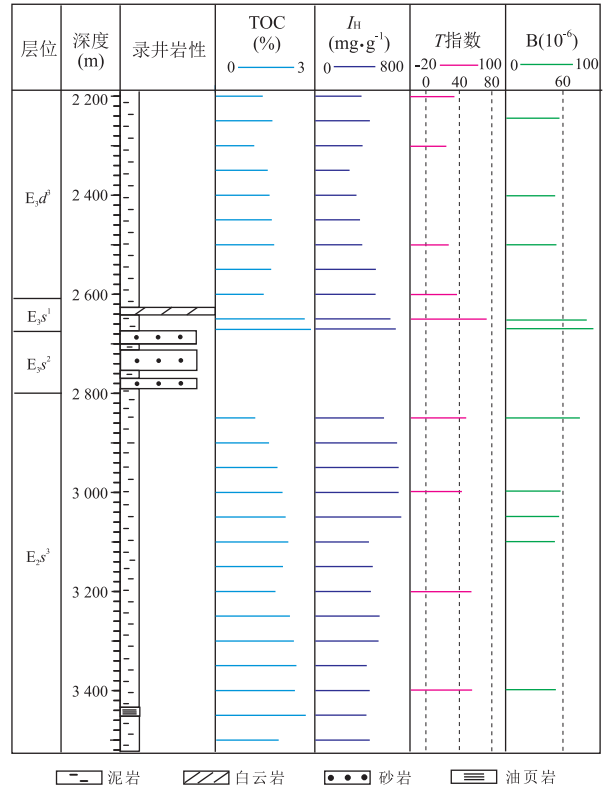


图 11 辽西凹陷 AZ2-1 井单井柱状图

Fig.11 Single well histogram of AZ2-1 in Liaoxi sag

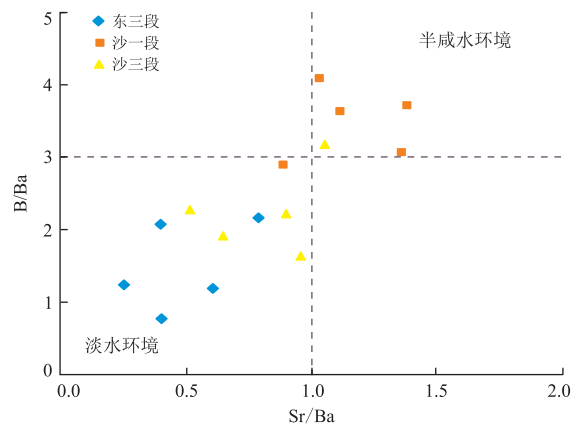


图 12 烃源岩 B/Ga 与 Sr/Ba 的关系

Fig.12 Relationship between B/Ga and Sr/Ba of source rocks

湖泊水体盐度演化。B、Sr 和 Ga 等微量元素与古湖泊水体盐度变化具有内在的联系，本次采用 B、B/Ga 和 Sr/Ba 3 个参数，基于傅强(2005)提出的盐度划分指

标(表 4),对辽东湾地区烃源岩发育的保存条件进行了分析。

辽西凹陷 AZ2-1 井东三段和沙三段岩性为灰色泥岩(图 11),B 元素范围主要为 $(50 \sim 60) \times 10^{-6}$,说明了这两个层段为淡水湖泊沉积,发育烃源岩 TOC 的平均值分别为 1.57% 与 2.08%;而沙一段岩性主要为白云岩和深灰色—黑色的泥岩层,且 B 元素平均含量高达 87.5×10^{-6} ,证明了该层段沉积时期湖水盐度大,整体处于缺氧—半缺氧的环境中,烃源岩 TOC 的平均值为 2.85%,与东三、沙三两个层段的烃源岩相比,其 TOC 值明显变大,说明盐度增大可导致水体分层,控制缺氧程度,进而影响烃源岩的发育。此外,根据辽东湾地区 10 口典型井 15 个样点数的 B/Ga 和 Sr/Ba 值(图 12),同样证明东三段及沙三段处于淡水环境中,烃源岩 TOC 的平均值分别为 1.42% 和 2.12%,而沙一段处于半咸水环境,烃源岩 TOC 的平均值高达 2.95%,均可证明相同的观点。

4 结论

(1)辽西凹陷和辽中凹陷古近系主要发育沙三段、沙一段和东三段 3 套湖泊相成因的烃源岩。根据典型井的热解、热模拟实验及有机岩石学数据,认为沙一段烃源岩有机质丰度最高,多来自于生产力较高的偏低等水生生物,沙三段烃源岩有机质丰度较高且多为混合型来源,东三段烃源岩有机质丰度最低,多来自于生产力较低的偏陆源高等植物。

(2)利用典型井地化—测井信息建立了研究区烃源岩有机碳含量(TOC)和热解烃(S_2)的测井定量预测模型,并预测了研究区烃源岩有机碳含量和有机质类型平面分布,认为研究区共存在 5 个生烃中心。其中,辽中凹陷烃源岩品质(有机质丰度和类型)整体优于辽西凹陷,且由东北至西南方向,烃源岩品质逐渐变差。

(3)根据研究区构造沉降史、有机岩石学及元素地球化学资料等,结合烃源岩平面分布特征,认为辽东湾地区古近系烃源岩的发育主要受到构造沉降、古生产力和保存环境等因素控制,进而导致烃源岩品质在平面和纵向上具有一定的差异性。

References

Bostick, B.C., Fendorf, S., Helz, G.R., 2003. Differential Adsorption of Molybdate and Tetrathiomolybdate on Py-

rite (FeS_2). *Environmental Science & Technology*, 37 (2): 285—291. <https://doi.org/10.1021/es0257467>

Carroll, A.R., Bohacs, K.M., 1999. Stratigraphic Classification of Ancient Lakes: Balancing Tectonic and Climatic Controls. *Geology*, 27 (2): 99. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1999\)027<0099:scoalb>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1999)027<0099:scoalb>2.3.co;2)

Chen, J.P., Sun, Y.G., Zhong, N.N., et al., 2014. The Efficiency and Model of Petroleum Expulsion from the Lacustrine Source Rocks within Geological Frame. *Acta Geologica Sinica*, 88 (11): 2005—2032 (in Chinese with English abstract).

Chen, Y. H., Yao, G. S., Liu, Z., et al., 2016. Total Organic Carbon Quantitative Prediction Using Seismic Information. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 47 (1): 159—165 (in Chinese with English abstract).

Ding, X.J., Liu, G.D., Huang, Z.L., et al., 2015. Source Rock Distribution and Formation in Saihantala Depression, Erlian Basin. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 46 (5): 1739—1746 (in Chinese with English abstract).

Fu, Q., 2005. Rare Elements Utility in Paleo-Lake Evolution and Signification of Lower Tertiary Funing Formation, Gaoyou Sag, Subei Basin. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 33 (9): 1219—1223, 1239 (in Chinese with English abstract).

Hakimi, M. H., Abdullah, W. H., Shalaby, M. R., 2012. Geochemical and Petrographic Characterization of Organic Matter in the Upper Jurassic Madbi Shale Succession (Masila Basin, Yemen): Origin, Type and Preservation. *Organic Geochemistry*, 49: 18—29. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2012.05.005>

Han, S. B., Horsfield, B., Zhang, J. C., et al., 2014. Hydrocarbon Generation Kinetics of Lacustrine Yanchang Shale in Southeast Ordos Basin, North China. *Energy & Fuels*, 28 (9): 5632—5639. <https://doi.org/10.1021/ef501011b>

Huang, X. F., Wu, W., Feng, L., et al., 2016. Assessment of the Source Rocks from the Dongying Formation in the Liaozhong Depression, Liaodong Bay. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 36 (2): 81—86 (in Chinese with English abstract).

Jia, D. H., Xu, C. G., Yang, B., et al., 2007. Paleogene Palaeogeomorphology Reconstruction and Evolution and Its Control on Sedimentary Systems in Central-Southern Liaodong Zone, Liaodongwan Bay. *Journal of Palaeogeography*, 9 (2): 155—166 (in Chinese with English abstract).

- Jiang, S., Cai, D.S., Zhu, X.M., et al., 2007. Mechanism of the Pore Evolution in Liaodong Bay Area. *Earth Science*, 32 (3): 366—372 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, X., Zou, H. Y., Yang, Y. Y., 2013. Discussion on Correlation between Microscopic Characteristics and Hydrocarbon Generation Potential of Source Rocks in Liaodong Bay Area. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 20(1): 19—23 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, X., Zou, H. Y., Zhuang, X. B., et al., 2010. Characteristics of Hydrocarbon Source Rocks in Liaodong Bay Area and Its Main Controlling Factors. *Journal of China University of Petroleum (Natural Science)*, 34 (2): 31—37, 42 (in Chinese with English abstract).
- Jin, Q., Zha, M., 2000. Co-Sedimentation of Tertiary Evaporites and Oil Source Rocks in the Western Qaidam Basin. *Scientia Geologica Sinica*, 35(4): 465—473 (in Chinese with English abstract).
- Jin, Q., Zhu, G. Y., Wang, J., 2008. Deposition and Distribution of High-Potential Source Rocks in Saline Lacustrine Environments. *Journal of China University of Petroleum (Natural Science)*, 32(4): 19—23 (in Chinese with English abstract).
- Le Doan, T. V., Bostrom, N. W., Burnham, A. K., et al., 2013. Green River Oil Shale Pyrolysis; Semi-Open Conditions. *Energy & Fuels*, 27(11): 6447—6459. <https://doi.org/10.1021/ef401162p>
- Li, D. J., Zhu, X. M., Dong, Y. L., et al., 2007. Sequence Stratigraphy and Depositional System of Paleogene Shahejie Formation in Liaodong Bay Depression. *Petroleum Exploration and Development*, 34(6): 669—676 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. M., Zhang, J., Yu, X. L., et al., 2013. Determination of Maturity for Source Rocks in Biyang Sag of Nanxiang Basin and Its Significance. *Petroleum Geology & Experiment*, 35(1): 76—80, 86 (in Chinese with English abstract).
- Lin, J. F., Hao, F., Hu, H. Y., et al., 2015. Depositional Environment and Controlling Factors of Source Rocks in the Shahejie Formation of Langgu Sag. *Acta Petrolei Sinica*, 36(2): 163—173 (in Chinese with English abstract).
- Liu, L., Chen, H. D., Xu, C. G., et al., 2015. Study on Seismite Features and Its Time-Space Distribution Law of Paleogene in Liaodong Bay Depression. *Acta Sedimentologica Sinica*, 33(5): 919—931 (in Chinese with English abstract).
- Lu, X. S., Song, Y., Zhao, M. J., et al., 2014. Thermal History Modeling of Complicated Extrusional Section and Source Rock Maturation Characteristics in Kuqa Foreland Basin. *Natural Gas Geoscience*, 25 (10): 1547—1557 (in Chinese with English abstract).
- Murray, R. W., Knowlton, C., Leinen, M., et al., 2000. Export Production and Carbonate Dissolution in the Central Equatorial Pacific Ocean over the Past 1 Myr. *Paleoceanography*, 15 (6): 570—592. <https://doi.org/10.1029/1999pa000457>
- Nan, S., Han, X. F., Pan, L. L., et al., 2013. Sedimentary Facies of Shahejie Formation in Jinzhou 20-2 Gas Field in Liaodong Bay. *Lithologic Reservoirs*, 25(3): 36—42 (in Chinese with English abstract).
- Passey, Q. R., Creaney, S., Kulla, J. B., et al., 1990. Practical Model for Organic Richness from Porosity and Resistivity Logs. *AAPG Bulletin*, 74(12): 1777—1794. <https://doi.org/10.1306/0c9b25c9-1710-11d7-8645000102c1865d>
- Shen, Z. M., Wei, J. H., Zhu, H. Q., et al., 2009. Comparative Research on Maturity Feature and Maturity Indicator of Coal Source Rock from West Sichuan Basin Depression. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 29(4): 83—88 (in Chinese with English abstract).
- Tang, L. J., Wan, G. M., Zhou, X. H., et al., 2008. Cenozoic Geotectonic Evolution of the Bohai Basin. *Geological Journal of China Universities*, 14(2): 191—198 (in Chinese with English abstract).
- Tian, J. Q., Zou, H. Y., Zhou, X. H., et al., 2011. Biomarker Characteristics of Source Rocks and Oil-Source Correlation in Liaodong Bay. *Journal of China University of Petroleum (Natural Science)*, 35(4): 53—58 (in Chinese with English abstract).
- Tian, Y., Ye, J. R., Lei, C., et al., 2016. Development Controlling Factors and Forming Model for Source Rock of Yueguifeng Formation in Lishui-Jiaojiang Sag, the East China Sea Continental Shelf Basin. *Earth Science*, 41 (9): 1561—1571 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.116>
- Tyrrell, T., 1999. The Relative Influences of Nitrogen and Phosphorous on Oceanic Primary Production. *Nature*, 400(6744): 525—531. <https://doi.org/10.1038/22941>
- Wang, L. Q., Li, C., Li, Q. Z., et al., 2013. Reservoir Sedimentary of Lüda 10-1 Oilfield in Liaodong Bay Basin. *Lithologic Reservoirs*, 25 (5): 24—30 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Zou, H. Y., Hao, F., et al., 2014. Modeling Hydrocarbon Generation from the Paleogene Source Rocks in Liaodong Bay, Bohai Sea: A Study on Gas Potential of Oil-Prone Source Rocks. *Organic Geochemistry*, 76: 204—219. <https://doi.org/10.13039/501100001809>
- Wei, H. F., Chen, J. F., Chen, X. D., et al., 2013. The Controlling Factors and Sedimentary Environment for Develop-

- ping Coastal Coal-Bearing Source Rock of Pinghu Formation in Xihu Depression. *Geology in China*, 40(2): 487—497 (in Chinese with English abstract).
- Xu, C. G., Zhu, X. X., Shi, C. E., et al., 2009. Control of Dongying Formation Mudstone upon the Distribution of Hydrocarbon Accumulations in the Liaodong Bay Depression. *Oil & Gas Geology*, 30(4): 431—437 (in Chinese with English abstract).
- Yang, B. L., Ye, J. R., Wang, Z. S., et al., 2014. Hydrocarbon Accumulation Models and Main Controlling Factors in Liaodong Bay Depression. *Earth Science*, 39(10): 1407—1420 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2014.133>
- Yu, Y. X., Zhou, X. H., Xu, C. G., et al., 2014. Different Deformation of Strike Slip Faults in the Liaodongwan Depression, Offshore Bohai Bay Basin. *Oil & Gas Geology*, 35(5): 632—638 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, H. S., Cai, Y. W., Huo, Q. L., et al., 2013. Evaluation of the Effective Organic Matter Types in Hydrocarbon Source Rock and Its Implication. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 32(3): 8—14 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H., Zhu, G. Y., 2007. Using Seismic and Log Information to Predict and Evaluate Hydrocarbon Source Rocks: An Example from Rich Oil Depressions in Bohai Bay. *Petroleum Exploration and Development*, 34(1): 55—59 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. Y., Kong, X. X., Zhang, C. R., et al., 2003. High-Quality Oil-Prone Source Rocks in Jiyang Depression. *Geochimica*, 32(1): 35—42 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y. T., Shan, X. L., Sun, J., 2015. Geochemical Characteristics and Hydrocarbon Generation Processes of Cretaceous Source Rocks in the Songliao Basin. *Petroleum Science and Technology*, 33(4): 443—451. <https://doi.org/10.1080/10916466.2014.992534>
- Zhou, X., He, S., Chen, Z. Y., et al., 2016. Characteristics and Controlling Factors of Source Rocks in Yanchang Formation Sequence Framework, Ordos Basin. *Earth Science*, 41(6): 1055—1066 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.087>
- Zhu, G. Y., Jin, Q., 2002. Study on Source Rock Heterogeneity—A Case of Niu-38 Well in Dongying Depression. *Acta Petrolei Sinica*, 23(5): 34—39 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, G. Y., Jin, Q., Zhang, L. Y., 2003. Using Log Information to Analyze the Geochemical Characteristics of Source Rocks in Jiyang Depression. *Well Logging Technology*, 27(2): 104—109 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈建平, 孙永革, 钟宁宁, 等, 2014. 地质条件下湖相烃源岩生排烃效率与模式. *地质学报*, 88(11): 2005—2032.
- 陈宇航, 姚根顺, 刘震, 等, 2016. 利用地震信息定量预测烃源岩 TOC 质量分数. *中南大学学报(自然科学版)*, 47(1): 159—165.
- 丁修建, 柳广弟, 黄志龙, 等, 2015. 二连盆地赛汉塔拉凹陷烃源岩的分布及形成. *中南大学学报(自然科学版)*, 46(5): 1739—1746.
- 傅强, 2005. 微量元素分析在高邮凹陷古近纪湖泊演化中的应用. *同济大学学报(自然科学版)*, 33(9): 1219—1223, 1239.
- 黄雪峰, 吴伟, 冯磊, 等, 2016. 辽东湾地区辽中凹陷东营组烃源岩评价. *沉积与特提斯地质*, 36(2): 81—86.
- 加东辉, 徐长贵, 杨波, 等, 2007. 辽东湾辽东带中南部古近纪古地貌恢复和演化及其对沉积体系的控制. *古地理学报*, 9(2): 155—166.
- 蒋恕, 蔡东升, 朱筱敏, 等, 2007. 辽东湾地区孔隙演化的机理. *地球科学*, 32(3): 366—372.
- 姜雪, 邹华耀, 杨元元, 2013. 辽东湾地区烃源岩微观特征与生烃潜力相关性探讨. *断块油气田*, 20(1): 19—23.
- 姜雪, 邹华耀, 庄新兵, 等, 2010. 辽东湾地区烃源岩特征及其主控因素. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 34(2): 31—37, 42.
- 金强, 查明, 2000. 柴达木盆地西部第三系蒸发岩与生油岩共生沉积作用研究. *地质科学*, 35(4): 465—473.
- 金强, 朱光有, 王娟, 2008. 咸化湖盆优质烃源岩的形成与分布. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 32(4): 19—23.
- 李德江, 朱筱敏, 董艳蕾, 等, 2007. 辽东湾拗陷古近系沙河街组层序地层分析. *石油勘探与开发*, 34(6): 669—676.
- 李志明, 张隽, 余晓露, 等, 2013. 南襄盆地泌阳凹陷烃源岩成熟度厘定及其意义. *石油实验地质*, 35(1): 76—80, 86.
- 林俊峰, 郝芳, 胡海燕, 等, 2015. 廊固凹陷沙河街组烃源岩沉积环境与控制因素. *石油学报*, 36(2): 163—173.
- 刘磊, 陈洪德, 徐长贵, 等, 2015. 辽东湾古近系震积岩特征及其时空分布规律研究. *沉积学报*, 33(5): 919—931.
- 鲁雪松, 宋岩, 赵孟军, 等, 2014. 库车前陆盆地复杂挤压剖面热演化历史模拟及烃源岩成熟度演化特征. *天然气地球科学*, 25(10): 1547—1557.
- 南山, 韩雪芳, 潘玲黎, 等, 2013. 辽东湾海域锦州 20—2 气田沙河街组沉积相研究. *岩性油气藏*, 25(3): 36—42.
- 沈忠民, 魏金花, 朱宏权, 等, 2009. 川西拗陷煤系烃源岩成熟度特征及成熟度指标对比研究. *矿物岩石*, 29(4): 83—88.
- 汤良杰, 万桂梅, 周心怀, 等, 2008. 渤海盆地新生代构造演化特征. *高校地质学报*, 14(2): 191—198.

- 田金强,邹华耀,周心怀,等,2011.辽东湾地区烃源岩生物标志物特征与油源对比.中国石油大学学报(自然科学版),35(4): 53-58.
- 田杨,叶加仁,雷闯,等,2016.东海陆架盆地丽水-椒江凹陷月桂峰组烃源岩发育控制因素及形成模式.地球科学,41(9): 1561-1571. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.116>
- 王力群,李超,李其正,等,2013.辽东湾盆地旅大10-1油田储层沉积学研究.岩性油气藏,25(5): 24-30.
- 魏恒飞,陈践发,陈晓东,等,2013.西湖凹陷平湖组滨海型煤系烃源岩发育环境及其控制因素.中国地质,40(2): 487-497.
- 徐长贵,朱秀香,石翠娥,等,2009.辽东湾坳陷古近系东营组泥岩对油气藏分布的控制作用.石油与天然气地质,30(4): 431-437.
- 杨宝林,叶加仁,王子嵩,等,2014.辽东湾断陷油气成藏模式及主控因素.地球科学,39(10): 1407-1420. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2014.133>
- 余一欣,周心怀,徐长贵,等,2014.渤海辽东湾坳陷走滑断裂差异变形特征.石油与天然气地质,35(5): 632-637.
- 曾花森,蔡郁文,霍秋立,等,2013.烃源岩中有效有机质的类型评价及意义.大庆石油地质与开发,32(3): 8-14.
- 张寒,朱光有,2007.利用地震和测井信息预测和评价烃源岩——以渤海湾盆地富油凹陷为例.石油勘探与开发,34(1): 55-59.
- 张林晔,孔祥星,张春荣,等,2003.济阳坳陷下第三系优质烃源岩的发育及其意义.地球化学,32(1): 35-42.
- 周翔,何生,陈召佑,等,2016.鄂尔多斯盆地南部延长组层序地层格架中烃源岩特征及控制因素.地球科学,41(6): 1055-1066. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.087>
- 朱光有,金强,2002.烃源岩的非均质性研究——以东营凹陷牛38井为例.石油学报,23(5): 34-39.
- 朱光有,金强,张林晔,2003.用测井信息获取烃源岩的地球化学参数研究.测井技术,27(2): 104-109.