

The Characteristics of Source Rock of Es1^x in Lixian Slope-Suning Subsag of Raoyang Sag

Dexiang Yang¹, Quan Wang¹, Fangwen Chen^{2*}, Shuangfang Lu²

¹Exploration and Development Research Institute, Huabei Oilfield Company, PetroChina, Renqiu Hebei

²Unconventional Oil & Gas and Renewable Energy Research Institute, China University of Petroleum, Qingdao Shandong
Email: *cfwdqpi@163.com

Received: Dec. 2nd, 2016; accepted: Dec. 19th, 2016; published: Dec. 22nd, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Because of the accumulation and wealth of the core analysis data from the lower part of first member (Es1^x) source rocks in Lixian Slope-Suning Subsag of Raoyang Sag in recent years, it's necessary to evaluate the hydrocarbon-generation amount of the Es1^x source rocks. The geochemical characteristics of core samples from the Es1^x source rocks in Lixian Slope-Suning Subsag of Raoyang Sag were analyzed. The hydrocarbon-generation amount of the Es1^x source rock in Lixian Slope-Suning Subsag was calculated using the chemical kinetics, which is based on the high-temperature thermal simulation of low maturity source rock samples. The results show that: the Es1^x source rock in Lixian Slope-Suning Subsag is high richness of organic matter, good type (II₁-I), and the thermal evolution stage is from low-mature to mature. The threshold of hydrocarbon generation of them is about 3000 m, and beginning to quickly generate hydrocarbon at about 3500 m. The source rocks of Es1^x are mainly generated oil. The amounts of generated oil and gas are 7.14×10^8 t and 0.21×10^{11} m³. The oil and gas resource are $(0.36 - 1.43) \times 10^8$ t and $(0.001 - 0.004) \times 10^{11}$ m³ from the Es1^x source rocks in Lixian Slope-Suning Subsag.

Keywords

Raoyang Sag, Lixian Slope-Suning Subsag, Lower Part of First Member (Es1^x), Source Rocks

饶阳凹陷蠡县斜坡 - 肃宁洼槽沙一下亚段烃源岩特征

杨德相¹, 王 权¹, 陈方文^{2*}, 卢双舫²

*通讯作者。

文章引用: 杨德相, 王权, 陈方文, 卢双舫. 饶阳凹陷蠡县斜坡 - 肃宁洼槽沙一下亚段烃源岩特征[J]. 地球科学前沿, 2016, 6(6): 450-458. <http://dx.doi.org/10.12677/ag.2016.66047>

¹中国石油华北油田公司勘探开发研究院, 河北 任丘

²中国石油大学(华东)非常规油气与新能源研究院, 山东 青岛

Email: *cfwdqpi@163.com

收稿日期: 2016年12月2日; 录用日期: 2016年12月19日; 发布日期: 2016年12月22日

摘要

随着近些年饶阳凹陷蠡县斜坡-肃宁洼槽沙一下亚段烃源岩层段岩心分析资料的积累和丰富,有必要对其生烃量进行定量评价。本文通过对饶阳凹陷蠡县斜坡-肃宁洼槽沙一下亚段(Es₁^x)烃源岩岩心样品进行地化特征统计,以低成熟度的烃源岩样品进行高温热模拟实验为基础,利用化学动力学方法计算饶阳凹陷蠡县斜坡-肃宁洼槽沙一下亚段烃源岩生烃量。研究表明:饶阳凹陷蠡县斜坡-肃宁洼槽沙一下亚段烃源岩有机质丰度较高、类型主要为II₁-I型、处于低熟-成熟热演化阶段;其生烃门限大约为3000 m,约在3500 m开始大量生烃;该烃源岩以生油为主,生油、生气量分别为 7.14×10^8 t和 0.21×10^{11} m³,所能聚集的油、气资源量分别为 $(0.36 \sim 1.43) \times 10^8$ t和 $(0.001 \sim 0.004) \times 10^{11}$ m³。

关键词

饶阳凹陷, 蠡县斜坡-肃宁洼槽, 沙一下亚段, 烃源岩

1. 引言

饶阳凹陷蠡县斜坡-肃宁洼槽沙一下亚段(Es₁^x)包括下部“尾砂岩”和上部“特殊岩性段”等2部分。“特殊岩性段”主要沉积砂岩、泥岩、油页岩、生物碎屑灰岩、鲕粒灰岩、泥灰岩和白云岩等岩性,按照狭义和广义的定义都属于典型的“混积岩”[1]。国内外众多学者对海陆过渡带、海滨岸带和陆棚环境“混积岩”进行了大量研究,提出了4种混合成因:间断混合(punctuated mixing);相混合(facies mixing);原地混合(*in situ* mixing);源地混合(source mixing)[2];总结了4种混合沉积环境和沉积相模式:陆相环境;海陆过渡环境和滨海岸环境;陆棚环境;斜坡到盆地环境[3][4];分析构造作用、气候条件、物源、海平面变化等因素对“混积岩”控制作用[5][6][7];定性评价其成岩作用、划分成岩阶段[8];开展层序地层特征研究,进行等时层序对比[9]。这些研究主要集中在对“混积岩”的成因和沉积等方面,而专门针对陆相湖盆的“混积岩”的烃源岩特征研究相对较少,尤其是研究区目的层段上部“特殊岩性段”中烃源岩成烃转化率、生烃量等问题已经严重制约该区油气的勘探与开发,亟需解决。因此,本文选取饶阳凹陷蠡县斜坡-肃宁洼槽沙一下亚段烃源岩作为研究对象,对烃源岩的丰度、类型、成熟度、成烃转化率和生烃量等开展研究。

2. 研究区概况

蠡县斜坡-肃宁洼槽是冀中拗陷最为重要的勘探区域之一,位于富油的饶阳凹陷西部,属于西高东低、北东走向的继承性沉积缓坡-洼槽组合[10]。蠡县斜坡-肃宁洼槽北部以出岸鼻状构造右翼为界,南部以高阳-西柳鼻状构造带左翼为界,西部以高阳断层为界,东部以任西洼槽和肃宁洼槽东坡为屈。研究区自北向南发育4组北西向鼻状构造:同口-博士庄鼻状构造、高阳-西柳鼻状构造、大百尺-赵皇庄鼻状构造和蠡县鼻状构造。研究区具有南北分区、东西分带的构造格局[11]。蠡县斜坡-肃宁洼槽走向上以高阳-西柳鼻状构造带为界分为南部和北部,同时根据断层发育特征和地层形态特点在倾向上(NW-ES)将蠡县斜坡划分为斜坡内带、斜坡中带和斜坡外带(图1)。自北向南总体呈现出台地区和单斜区

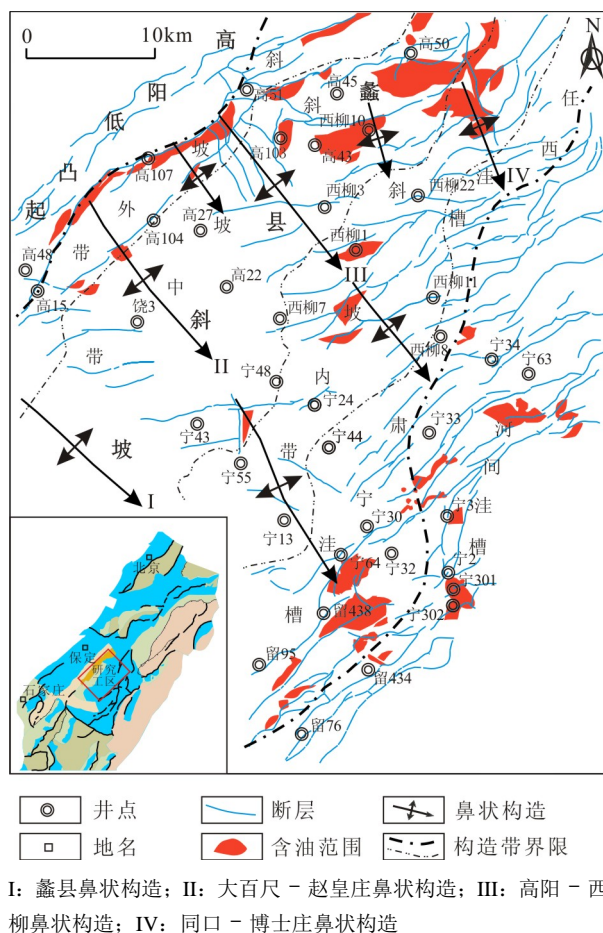


Figure 1. The exploration result of Es_1^x in Lixian Slope-Suning Subsag of Raoyang Sag

图 1. 饶阳凹陷蠡县斜坡 - 肃宁洼槽沙一下亚段勘探成果图

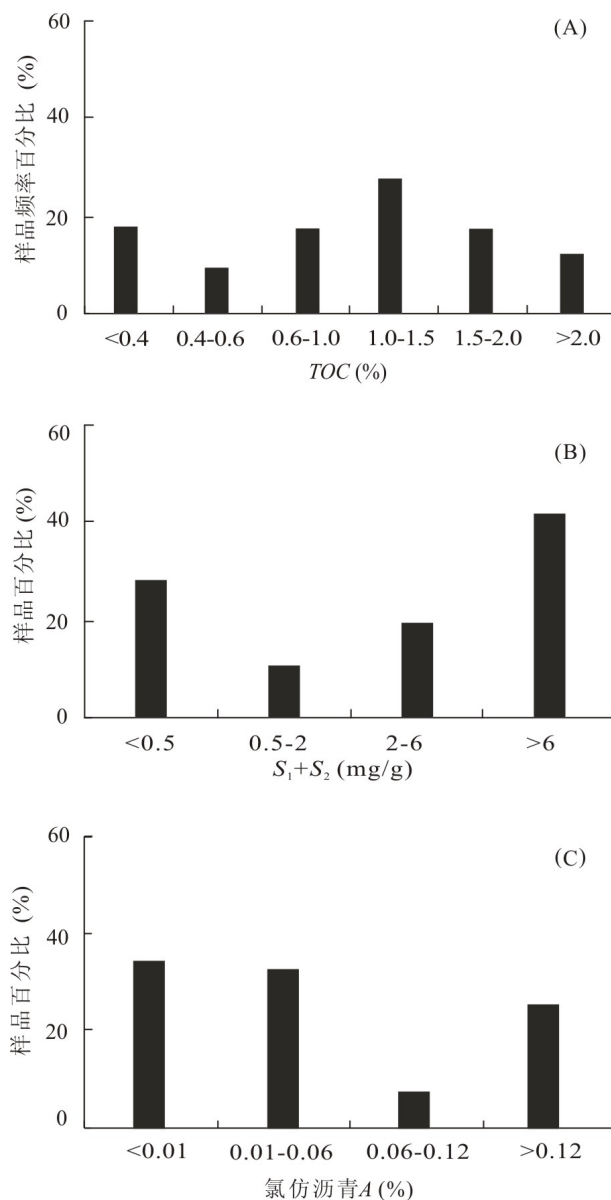
两大地貌单元，而斜坡东西方向，从凸起到洼陷则分为单斜区和平台 - 台坪区[12]。

研究区古近纪经历了 2 次大规模的湖进与湖退，一次为沙三段沉积早中期，另一次为沙一段沉积早期，即沙一下亚段沉积时期[13]。来自西南方向的安国 - 博野水系和北部的清苑 - 高阳水系控制着研究区碎屑岩沉积展布。前者为主物源，覆盖了蠡县斜坡大面积地区，从南部一直延伸到高阳 - 西柳鼻状构造带的东翼。北部为次要物源方向，控制了同口 - 博士庄等地区的沉积相。陆源碎屑主要为三角洲平原、三角洲前缘和滨浅湖沉积。随着湖平面快速上升，加之物源供应不足，在研究区目的层段上部广泛发育一套“特殊岩性段”，包括碎屑岩砂质滩坝、碳酸盐滩坝(含鲕粒灰岩、生物灰岩、泥灰岩、白云岩等)和油页岩等[14] [15]，形成一套自生自储的含油层系。其中，“特殊岩性段”中的暗色泥岩和油页岩是主要的烃源岩。蠡县斜坡 - 肃宁洼槽沙一下亚段已探明油气主要分布斜坡外带、肃宁洼槽陡坡带和斜坡北部等构造高部位。油藏类型主要为断鼻油藏和断块油藏、其次为上倾尖灭油藏和透镜体油藏[16]。

3. 烃源岩地化特征

3.1. 有机质丰度

对饶阳凹陷蠡县斜坡 - 肃宁洼槽内 110 口钻遇中沙一下亚段的探井和评价井共 1819 个样品点的地化特征进行统计(图 2)。沙一下亚段烃源岩 TOC 值范围为 0.08%~6.02%，数据点多大于 0.6%，平均值为 1.37%；



(A) 有机碳 TOC; (B) 产油潜量 $S_1 + S_2$; (C) 氯仿沥青“ A”

Figure 2. Distribution histogram of richness of organic matter from the Es1^x source rocks in Lixian Slope-Suning Subsg of Raoyang Sag

图 2. 饶阳凹陷蠡县斜坡 - 肃宁洼槽 Es1^x 烃源岩有机质丰度分布直方图

产油潜量 $S_1 + S_2$ 值范围为 0.02~59.51 mg/g, 数据点多大于 2.00 mg/g, 平均值为 23.07 mg/g; 氯仿沥青“ A” 含量为 0.02%~1.66%, 平均值为 0.44%。按照黄第藩等[17]提出的陆相源岩的评价标准, 饶阳凹陷蠡县斜坡 - 肃宁洼槽沙一下亚段烃源岩有机质丰度较高, 达到好 - 优质源岩的标准。

3.2. 有机质类型

通过对饶阳凹陷蠡县斜坡 - 肃宁洼槽 14 口探井共 24 个 Es1^x 烃源岩样品的有机元素分析数据进行统计, 制作饶阳凹陷蠡县斜坡 - 肃宁洼槽 Es1^x 有机质氢碳原子比和氧碳原子比 H/C-O/C 关系图(图 3), 确

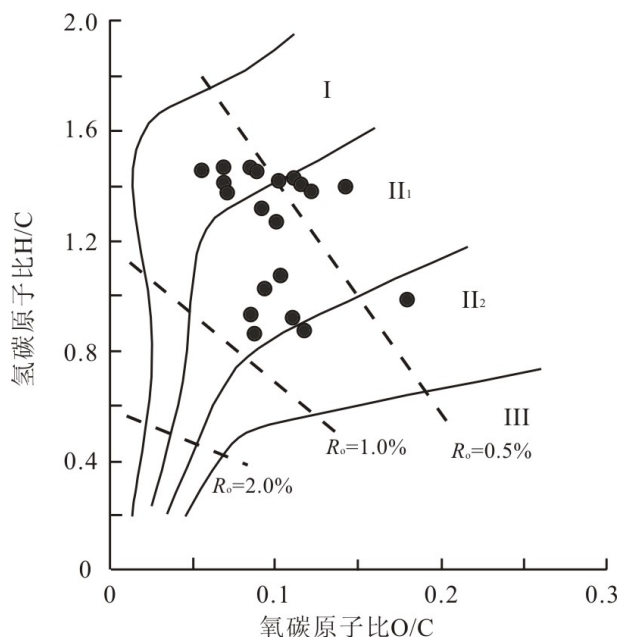


Figure 3. H/C-O/C relation diagram of organic matter from the Es1^x source rocks in Lixian Slope-Suning Subsag of Raoyang Sag
图 3. 饶阳凹陷蠡县斜坡 - 肃宁洼槽 Es1^x 烃源岩有机质 H/C-O/C 关系图

定饶阳凹陷蠡县斜坡 - 肃宁洼槽 Es1^x 烃源岩有机质类型主要为 II₁-I 型。从有利于生油的角度上看, 饶阳凹陷蠡县斜坡 - 肃宁洼槽 Es1^x 烃源岩类型较好。

3.3. 有机质成熟度

镜质体反射率(R_o)是反映有机质成熟度最有效的参数。一般认为 $R_o < 0.5\%$ 对应未成熟阶段, $0.5\% \sim 1.3\%$ 对应低熟 - 成熟阶段, $1.3\% \sim 2.0\%$ 对应高成熟阶段, $R_o > 2.0\%$ 对应过成熟阶段。对饶阳凹陷蠡县斜坡 - 肃宁洼槽 Es1^x 烃源岩的 29 口探井共 97 个样品点进行统计(图 4), 饶阳凹陷蠡县斜坡 - 肃宁洼槽 Es1^x 烃源岩有机质 R_o 值分布为 $0.36\% \sim 1.11\%$, 均值为 0.66% , 基本处于低熟 - 成熟热演化阶段, 少部分样品点分布于未成熟阶段。另外, H/C-O/C 关系也显示饶阳凹陷蠡县斜坡 - 肃宁洼槽 Es1^x 烃源岩热演化程度处于低熟 - 成熟阶段(图 3)。

4. 油气生成量及资源量评价

4.1. 成烃转化率

为了利用化学动力学计算饶阳凹陷蠡县斜坡 - 肃宁洼槽 Es1^x 烃源岩有机质的成烃转化率, 选取成熟度相对较低的高 58 井饶阳凹陷蠡县斜坡 - 肃宁洼槽 Es1^x 烃源岩样品($R_o = 0.44\%$)进行热解实验。热解实验在 Rock-Eval-II 型热解仪上进行, 从 200°C 开始, 分别以 $10^\circ\text{C}/\text{h}$ 、 $20^\circ\text{C}/\text{h}$ 和 $40^\circ\text{C}/\text{h}$ 的升温速率将样品加热至 600°C , 实时记录产油量、产气量与温度(时间)之间的关系。即可得到不同升温速率条件下各温度点的成油和成气转化率, 以此数据进行化学动力学标定(图 5), 标定方法见文献[18] [19]。

通过化学动力学标定, 得到饶阳凹陷蠡县斜坡 - 肃宁洼槽 Es1^x 烃源岩有机质成油、成气转化率与深度的关系(图 6)。根据成烃转化率与深度的关系, 确定饶阳凹陷蠡县斜坡 - 肃宁洼槽 Es1^x 烃源岩生烃门限约为 3000 m , 约在 3500 m 进入生烃高峰。

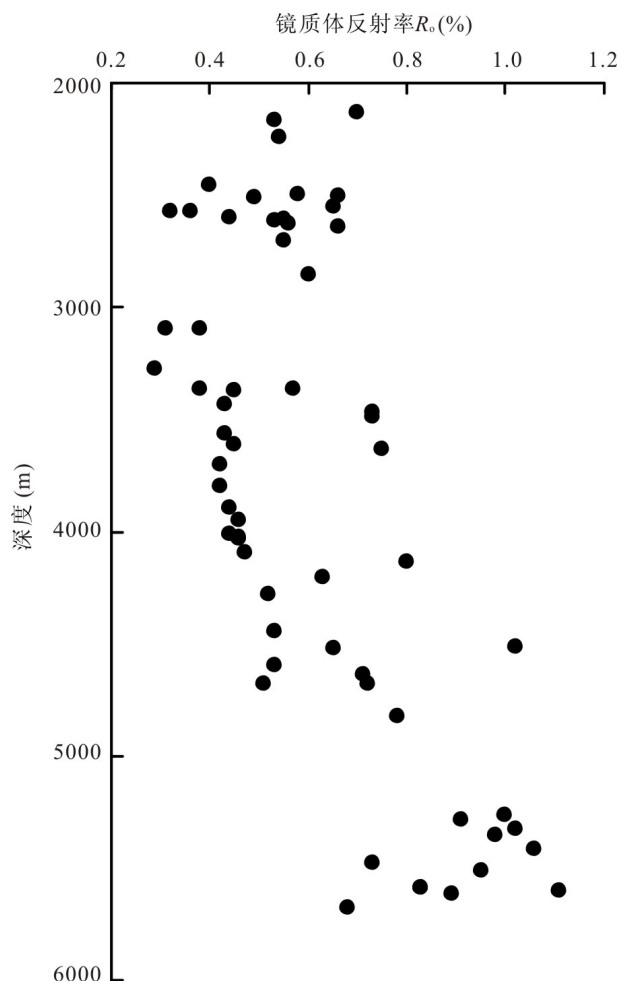


Figure 4. The relationship of R_o and depth from the $Es1^x$ source rocks in Lixian Slope-Suning Subsag of Raoyang Sag

图 4. 饶阳凹陷蠡县斜坡 - 肃宁洼槽 $Es1^x$ 烃源岩有机质镜质体反射率 R_o 与深度关系

4.2. 原始有机碳与原始氢指数

虽然饶阳凹陷蠡县斜坡 - 肃宁洼槽 $Es1^x$ 烃源岩处于未成熟至成熟演化阶段,但也生成并排出了一定数量的油气。目前实测的残余有机碳(TOC)不能反映烃源岩有机质的原始丰度,各项有机质性质指标所反映的有机质类型也有偏差。因此,进行生烃量计算时需要对有机质原始有机碳(TOC_0)和原始氢指数(HI_0)进行恢复。

依据化学动力学原理计算成烃转化率并恢复有机质原始有机碳和原始氢指数方法[20],利用上述成烃转化率,结合研究区埋藏史和热史,即可得到饶阳凹陷蠡县斜坡 - 肃宁洼槽 $Es1^x$ 烃源岩有机质的原始有机碳和原始氢指数(表 1)。恢复后的原始有机碳(TOC_0)和原始氢指数(HI_0)均明显高于实测残余有机碳(TOC)和残余产油潜量(HI)。

4.3. 油气资源量计算

以饶阳凹陷蠡县斜坡 - 肃宁洼槽 $Es1^x$ 烃源岩原始有机碳等值线图、原始氢指数等值线图、烃源岩顶底埋深等值线图以及有机质成烃转化率、烃源岩密度随深度的变化规律等数据为基础,对饶阳凹陷蠡县

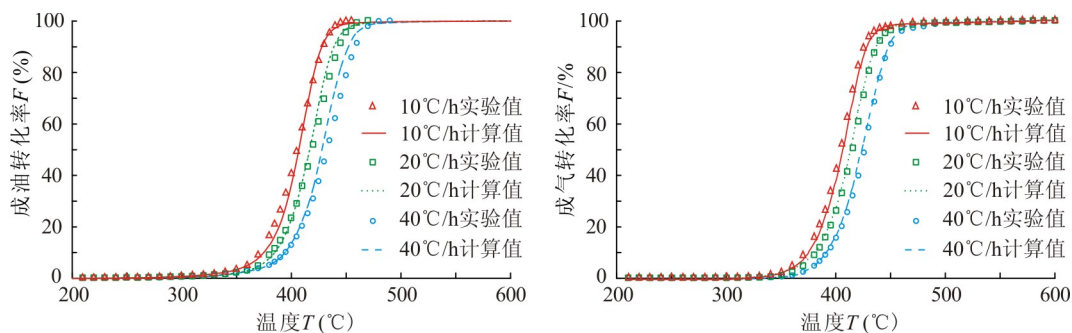


Figure 5. Transformation ratio of oil and gas generated from Es1x source rocks of Gao58 well at different temperature and heating rate

图 5. 高 58 井 Es1^x 烃源岩样品成油、成气转化率与温度及升温速率的关系

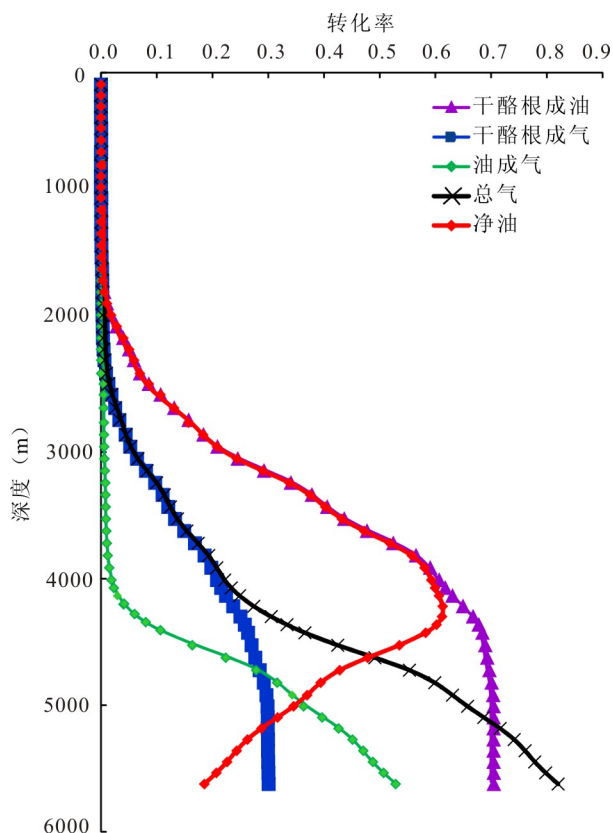


Figure 6. Transformation ratio section of the Es1^x source rocks in Lixian Slope-Suning Subsag of Raoyang Sag

图 6. 饶阳凹陷蠡县斜坡 - 肃宁洼槽 Es1^x 烃源岩成烃剖面

Table 1. Average original hydrogen index and total organic carbon of the Es1x source rocks in Lixian Slope-Suning Subsag of Raoyang Sag

表 1. 饶阳凹陷蠡县斜坡 - 肃宁洼槽 Es1x 烃源岩平均原始氢指数和原始有机碳

层位	残余氢指数 HI (mg/g)	原始氢指数 HI ₀ (mg/g)	氢指数恢复系数 HI ₀ /HI	残余有机碳 TOC (%)	原始有机碳 TOC ₀ (%)	有机碳恢复系数 TOC ₀ /TOC
Es1 ^x	23.07	312.83	13.56	1.37	1.69	1.23

斜坡 - 肃宁洼槽 Es1^x 烃源岩油气生成量进行定量计算。其中，原始有机碳等值线图、原始氢指数等值线

Table 2. Generated oil and gas of the Es₁^x source rocks in Lixian Slope-Suning Subsag of Raoyang Sag**表 2.** 饶阳凹陷蠡县斜坡 - 肃宁洼槽 Es₁^x 烃源岩总生油气量

层位	总净生油量/10 ⁸ t	总生气量/10 ¹¹ m ³	油资源量/10 ⁸ t (运聚系数 5%~20%)	气资源量/10 ¹¹ m ³ (运聚系数 0.5%~2%)
Es ₁ ^x	7.14	0.21	0.36~1.43	0.001~0.004

图和有机质成烃转化率随深度的变化规律是根据现有地化分析数据利用化学动力学计算得到；烃源岩顶底埋深等值线图为井震相结合的解释结果；烃源岩密度随深度的变化规律由实测样品点对密度测井曲线进行校正而得到。首先，将饶阳凹陷蠡县斜坡 - 肃宁洼槽 Es₁^x 地层按照 200 m × 200 m × 1 m 进行三维网格化；然后给每个网格单元赋予相应的烃源岩厚度、原始有机碳、原始氢指数和有机质成烃转化率；最后利用微积分方法将每个网格单元的油气生成量进行累加，即得到油气生成量。

按照现代油气成因机制，单位体积源岩生成油气量取决于有机质的丰度、类型和成熟度，每个网格单元的油气生成量计算方法为公式

$$Q = S \cdot H \cdot \rho \cdot \text{TOC}_0 \cdot \text{HI}_0 \cdot F \quad (1)$$

利用微积分求取凹陷总油气生成量计算方法见公式

$$Q = \int_1^n \int_{z_0}^z S \cdot \rho(z) \cdot \text{TOC}_0 \cdot \text{HI}_0 \cdot F(z) \cdot dzdn \quad (2)$$

式中， S 为网格单元面积，m²； $\rho(z)$ 为源岩密度，t/m³； $F(z)$ 为由化学动力学模型计算得到的成烃转化率， z_0 和 z 分别为烃源岩的最小和最大埋深，m； n 为网格单元数目。

按照此方法计算饶阳凹陷蠡县斜坡 - 肃宁洼槽 Es₁^x 烃源岩生油、生气量分别为 7.14 × 10⁸ t 和 0.21 × 10¹¹ m³。饶阳凹陷蠡县斜坡 - 肃宁洼槽 Es₁^x 烃源岩主要以生油为主，伴生少量天然气。参考前人研究结果[17] [21]，分别取油、气的运聚系数为 5%~20% 和 0.5%~2%，饶阳凹陷蠡县斜坡 - 肃宁洼槽 Es₁^x 烃源岩生成油气所能聚集的油、气资源量分别为 (0.36~1.43) × 10⁸ t 和 (0.001~0.004) × 10¹¹ m³ (表 2)。

5. 结论

1) 饶阳凹陷蠡县斜坡 - 肃宁洼槽沙一下亚段烃源岩有机质丰度较高，类型主要为 II₁-I 型，处于低熟 - 成熟热演化阶段。

2) 饶阳凹陷蠡县斜坡 - 肃宁洼槽沙一下亚段烃源岩的生烃门限大约为 3000 m，约在 3500 m 开始大量生烃。

3) 利用化学动力学方法计算饶阳凹陷蠡县斜坡 - 肃宁洼槽 Es₁^x 烃源岩以生油为主，生油、生气量分别为 7.14 × 10⁸ t 和 0.21 × 10¹¹ m³，所能聚集的油、气资源量分别为 (0.36~1.43) × 10⁸ t 和 (0.001~0.004) × 10¹¹ m³。

基金项目

国家自然科学基金项目(41302101, 41530315)，国家留学基金资助(201606455008)，山东省自然科学基金项目(ZR2016DL07)。

参考文献 (References)

- [1] Mount, J.F. (1984) Mixing of Silicilastics and Carbonate Sediments in Shallow Shelf Environments. *Geology*, **12**, 432-435. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1984\)12<432:MOSACS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1984)12<432:MOSACS>2.0.CO;2)
- [2] Mount, J.F. (1985) Mixing of Silicilastics and Carbonate Sediments: A Proposed First-Order Textural and Compositional Classification. *Sedimentology*, **32**, 435-442. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1985.tb00522.x>
- [3] 王国忠. 南海北部大陆架现代礁源碳酸盐与陆源碎屑的混合沉积作用[J]. 古地学报, 2001, 3(2): 47-54.

- [4] 杨永剑, 刘家铎, 田景春, 孟万斌, 张翔, 祝贺. 塔里木盆地上奥陶统桑塔木组混合沉积特征及控制因素[J]. 地质论评, 2011, 57(2): 185-192.
- [5] Aqrabi, A.A.M. (1996) Carbonate Siliciclastic Sediments of the Upper Cretaceous (Khasib, Tanuma and Sa'di Formations) of the Mesopotamian Basin. *Marine and Petroleum Geology*, **13**, 781-790.
[https://doi.org/10.1016/0264-8172\(96\)00022-0](https://doi.org/10.1016/0264-8172(96)00022-0)
- [6] Halfar, J., Ingle, J.C. and Godinez-Orta, L. (2004) Modern Non-Tropical Mixed Carbonate Siliciclastic Sediments and Environments of the Southwestern Gulf of California, Mexico. *Sedimentary Geology*, **165**, 93-115.
<https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2003.11.005>
- [7] Parcell, W.C. and Williams, M.K. (2005) Mixed Sediment Deposition in a Retro-Arc Foreland Basin: Lower Ellis Group (M. Jurassic), Wyoming and Montana USA. *Sedimentary Geology*, **177**, 175-194.
<https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2005.02.007>
- [8] 马艳萍, 刘立. 大港滩海区第三系湖相混积岩的成因与成岩作用特征[J]. 沉积学报, 2003, 21(4): 607-612.
- [9] 李祥辉. 层序地层中的混合沉积作用及其控制因素[J]. 高校地质学报, 2008, 14(3): 395-404.
- [10] 杨帆, 于兴河, 李胜利, 张峰, 任小军. 蠡县斜坡中南部油气分布与成藏模式研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2010, 32(5): 41-46.
- [11] 赵贤正, 卢学军, 崔周旗, 侯凤香. 断陷盆地斜坡带精细层序地层研究与勘探成效[J]. 地学前缘, 2012, 19(1): 10-19.
- [12] 杨帆, 于兴河, 张峰, 等. 冀中拗陷饶阳凹陷蠡县斜坡带层序地层发育模式及主控因素[J]. 古地理学报, 2010, 12(1): 82-89.
- [13] 张文朝, 杨德相, 陈彦均, 等. 冀中拗陷古近系沉积构造特征与油气分布规律[J]. 地质学报, 2008, 82(8): 1103-1112.
- [14] 崔周旗, 李文厚, 李莉, 等. 冀中饶阳凹陷蠡县斜坡古近系沙河街组沙二段及沙一段下亚段沉积相与隐蔽油藏[J]. 古地理学报, 2005, 7(3): 373-381.
- [15] 陈世悦, 王玲, 李聪, 蒲秀刚, 孙廷彬. 歧口凹陷古近系沙河街组一段下亚段湖盆咸化成因[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 40-47.
- [16] 杜金虎, 邹伟宏, 易士威, 等. 华北油田隐蔽油气藏的勘探[J]. 中国石油勘探, 2002, 7(3): 7-15.
- [17] 卢双舫, 胡慧婷, 刘海英, 等. 英台断陷深层的气源条件及勘探潜力[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40(4): 912-920.
- [18] 卢双舫. 有机质成烃动力学理论及其应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 1996: 62-74.
- [19] 卢双舫, 刘晓艳, 付晓泰, 等. 未熟 - 低熟油生成机理的化学动力学研究及其初步应用[J]. 沉积学报, 2001, 19(1): 130-135.
- [20] 卢双舫, 付广, 王朋岩, 等. 天然气富集主控因素的定量研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002: 14-49.
- [21] 周海燕, 庞雄奇, 姜振学, 等. 石油和天然气运聚效率的主控因素及定量评价[J]. 石油勘探与开发, 2002, 29(1): 14-18.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ag@hanspub.org