

垦西-罗家油区稠油成因

陈建渝 李永福

(中国地质大学石油系, 湖北武汉 430074)

田 波 魏世平 杨晓敏

(胜利油田孤岛采油厂, 山东东营 257062)

水洗和生物降解作用是稠油形成的最重要和最普遍的原因, 其强弱主要取决于盆地形成后断裂和不整合面的分布、盆地后期的抬升程度及底水活跃情况。垦西油区的第一类稠油主要因盆地后期抬升, 原生油藏接近地表而风化所致, 具有高密度、高粘度、高含硫及高凝固点之特征; 第二类稠油主要因底水活跃, 生物降解作用强烈而形成, 具有高密度、高粘度、高含硫和低凝固点特点。

关键词 稠油 物性特征 成因

第一作者简介 陈建渝 女 52 岁 教授 石油地球化学

稠油系指在原始油层温度下, 脱气原油粘度为 $100\sim 10\,000\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 或在 $15.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及一个 Pa 下密度为 $0.934\sim 1.00\text{ g/cm}^3$ ($10\sim 20\text{ API}$) 的原油; 密度大于 1.00 g/cm^3 ($< 10\text{ API}$), 粘度大于 $10\,000\text{ mPa}\cdot\text{s}$ 为特稠油^[1]。位于胜利油区的垦西-罗家油田稠油平均埋深 $2\,100\text{ m}$ ($1\,660\sim 2\,400\text{ m}$), 原油密度为 $0.985\,5\sim 1.092\,0\text{ g/cm}^3$, 粘度为 $6\,338\sim 41\,958\text{ mPa}\cdot\text{s}$ ($80\text{ }^{\circ}\text{C}$), 是典型的稠油及特稠油。

1 地质概况

垦西-罗家地区位于胜利油区沾化凹陷的中部(图 1)。该区稠油资源丰富, 地质储量高达几千万吨, 且分布范围广, 含油层系多, 从中中新世馆陶组直至始新世沙河街组第四段均有产出, 绝大部分分布在深层沙河街组四段储层。

东西走向的垦西大断层(1号)为本区主力断层, 倾向正南, 落差大, 下降盘形成了三合村洼陷; 上升盘, 垦西-罗家地区被一系列平行于垦西大断层、北倾的反向断层所切割。

本区发育有下第三系的沙河街组第四段(E_{s4})、

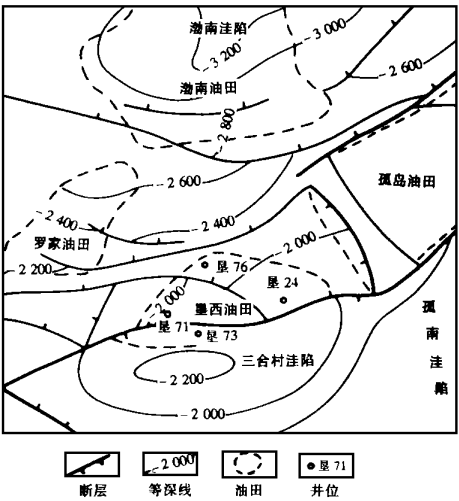


图 1 垦西-罗家油田位置及构造简图

第三段(E_{s3})、第一段(E_{s1})、东营组(E_d) 及上第三系的馆陶组(N_g)、明化镇组。各层段都发育良好的储集层,而区域性的油源层沙河街组第三段及第一段在此因埋藏浅,难以成为源岩。

2 油气特征及分布

2.1 油气特征

本区含油层系共 6 套,为馆陶组、东营组第二段、第三段、沙河街组第一段、第三段及第四段。另外,东营组二段顶至明化镇组有少量气层。除了稠油以外,主要在沙河街组一段及东营组二段还产出些稀油,它们表现出正常原油的性质。

垦西油田稠油按其物性可分为两类:第一类是以四高为特征的特稠油(表 1),即高密度($0.985\ 5\sim 1.092\ 0\text{ g/cm}^3$)、高粘度($6\ 338\sim 41\ 958\text{ mPa}\cdot\text{s}$)、高含硫($3.12\%\sim 8.61\%$)、高凝固点($20\sim 43\text{ }^\circ\text{C}$),主要产于沙河街组第四段储层;第二类稠油以三高一低为特征,高密度($0.942\ 8\sim 0.993\ 1\text{ g/cm}^3$),高粘度($151\sim 6\ 600\text{ mPa}\cdot\text{s}$),含硫较高($1\%\sim 3\%$),低凝固点(小于 $10\text{ }^\circ\text{C}$,甚至小于 $0\text{ }^\circ\text{C}$),主要产于馆陶组。

与邻区的稠油相比较,由于渤南-罗家地区沙河街组第四段含盐和石膏,因此,其中的原油含硫量大大高于一般的稠油。孤岛油田和孤南洼陷边缘馆陶组中的稠油均以三高一低为特征,即高密度($0.935\sim 0.99\text{ g/cm}^3$),高粘度($250\sim 5\ 700\text{ mPa}\cdot\text{s}$),高含硫($1.17\%\sim 3.38\%$),低凝固点($5\sim 32\text{ }^\circ\text{C}$),与垦西-罗家油田第二类相似。

表 1 垦西-罗家油田各层稠油平均物性表

层位	深度/m	密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	粘度/ $\text{mPa}\cdot\text{s}$	含硫量/ $\%$	凝固点/ $^\circ\text{C}$	总矿化度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	水型
E_{s4}	1 883~ 2 590	1.022 6~ 1.068 4	2 101~ 41 958	6.31~ 8.61	7~ 43	2 439~ 8 848	NaHCO_3
E_{s3}	1 835~ 2 530	0.985 5~ 1.092 0	5 064~ 33 076	0.68~ 7.61	7~ 39	4 997~ 9 159	NaHCO_3
E_{s1}	1 808~ 2 028	0.995~ 1.073 6	2 337~ 15 678	3.1~ 7.33	12~ 39	5 067~ 11 088	$\text{NaHCO}_3\text{ CaCl}_2$
E_{d3}	1 661~ 1 935	0.993 1~ 1.044 7	6 561~ 23 640	1.92~ 4.48	12~ 21	1 278~ 16 873	$\text{NaHCO}_3\text{ CaCl}_2$
N_g	1 366~ 1 696	0.942 8~ 0.952 7	151~ 442	1.09~ 1.83	- 17~ 23	7 355~ 18 557	$\text{NaHCO}_3\text{ CaCl}_2$

本区稠油的原油组分,特别是第一类稠油以高胶质($42\%\sim 49\%$)、高沥青质($20\%\sim 31\%$)、低蜡($2.2\%\sim 6.5\%$)为特征。与其相比,馆陶组中的第二类稠油具高胶质($27\%\sim 54.2\%$)和低沥青质含量(6.6%),较高的含蜡量($4.9\%\sim 7.2\%$)。

一般情况下原油的凝固点与含蜡量成正比,而垦西-罗家油田稠油具高凝固点,却不反映它的含蜡量。这是由于过高的沥青质与胶质含量造成特高粘度,而使原油丧失流动性,此为粘温凝固。它区别于高蜡原油中由于蜡的析出形成结晶骨架,使油丧失流动性造成的结构凝固。

表 2 垦西油田天然气物性基本参数表

井号	层位	h/m	$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}
				质量分数/ $\%$			
垦 108	N_g	1 174.1	0.559 9	98.70	0.07	0.00	0.00
垦 71-2	N_g	1 453.6	0.586 5	94.82	2.00	0.98	0.35
垦 73	N_g	1 365.2	0.577 2	96.64	2.04	0.46	0.19
垦气 1	N_g	1 444.0	0.580 0	95.72	2.53	0.39	-
垦 71-25	E_d	1 687.0	0.611 4	91.87	3.34	1.04	-
垦 24-1	E_{s1}	1 834.0	0.607 0	92.98	3.45	0.85	-
孤南 131	E_{s2}	3 280.0	0.831 1	78.75	4.71	2.33	4.91

本区天然气分布浅、层位广,以馆陶组为主。馆陶组、明化镇组、东营组天然气均为干气,密度低($0.55\sim 0.58\text{ g/cm}^3$),甲烷含量大于 95% 。与此相反,邻近的孤南洼陷沙河街组(孤南

131 井) 天然气为湿气, 密度高(0. 61~ 0. 88 g/ cm³), 重烃含量高(10 0%~ 30 0%)(表 2)。

2 2 油气分布

- 垦西油田油气分布具如下特点:
- (1) 分布层位多(馆陶组—沙河街组四段), 埋藏深度大(最大埋深可达 2 400 m)。
 - (2) 随油藏埋深增加, 不同层系中的原油物性变化明显, 原油密度及粘度表现出中→低→高、凝固点增高、含硫量突变的特征。
 - (3) 深层沙河街组四段含稠油面积最大, 几乎遍布垦西—罗家地区, 向上逐渐减小。馆陶组、东营组三段稠油只在垦西大断层下降盘富集。
 - (4) 在构造顶部(如垦 24 断块)以稀油和气为主, 向下逐渐过渡为稠油, 反映油藏内部存在重力分异。
 - (5) 浅层为干气, 深部有少量湿气。

3 油气成因

尽管本区大部分原油都遭受了不同程度的次生改造, 但是根据其中的生物标志物特征^[3], 并参考邻近的孤南油田、孤岛油田生油岩及原油的分析结果仍可以将原油按其成因分为两类(表 3, 图 2)。

表 3 垦西油田原油及岩石样品的生物标志物参数表

井号	深度/ m	产层	Pr/ Ph γ	蜡烷/ C ₃₀ 霍烷	C ₃₅ / C ₃₄ 霍烷	C ₂₉ s/ (r+ s)	C ₂₉ ββ/ (ββ+ αα)	生物降解程度	油源
垦 112- 1	1 399. 1	Ng	0. 67	0. 28	0. 73	0. 37	0. 45	较强降解	Es ₃
垦 112- 2	1 750. 1	Ed ₂	0. 96	0. 24	0. 70	0. 37	0. 46	轻微降解	Es ₃
垦 71- 41	1 698. 6	Ed ₃	0. 94	0. 15	0. 76	0. 41	0. 39	轻微降解	Es ₃
垦西 24- 1	1 834. 8	Es ₁	0. 96	0. 17	0. 80	0. 38	0. 35	正常	Es ₃
垦 24- 5	1 849. 2	Es ₃	0. 85	0. 18	0. 89	0. 41	0. 36	正常	Es ₃
垦 76- 1	2 478. 2	Es ₃	1. 56	0. 14	0. 74	0. 45	0. 52	正常	Es ₃
垦 73- 1	2 171. 2	Es ₄	0. 28	0. 80	2. 19	0. 40	0. 46	降解	Es ₄
垦 76x3	2 539. 9	Es ₄	0. 67	0. 67	1. 82	0. 37	0. 46	轻微降解	Es ₄

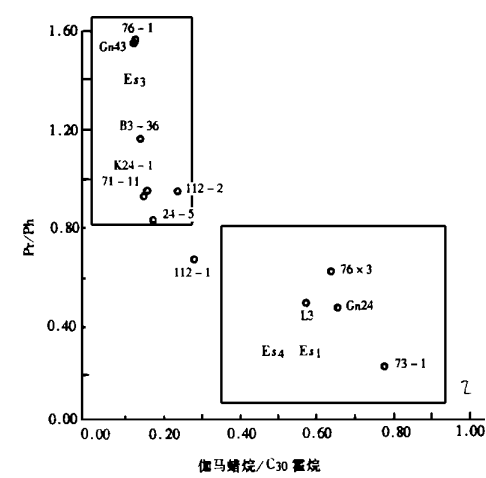


图 2 姥植比与伽马蜡烷指数相关图

第一类原油以 Pr/ Ph< 0. 8, 伽马蜡烷/ C₃₀αβ 霍烷比值> 0. 3, C₂₉霍烷的异构化系数 20S/ (20S+ 20R)> 0. 35, C₃₅霍烷> C₃₄霍烷为特征(图 3 中垦 73- 1 井), 与渤南洼陷沙河街组四段生油岩的生物标志物(罗 3 井)相似, 反映了断陷初期为闭塞湖盆高矿化度沉积环境。第二类原油以 Pr/ Ph> 0. 8、伽马蜡烷指数< 0. 3, C₂₉霍烷的异构化系数 20S/ (20S+ 20R) 值高(0. 32~ 0. 50)为特色(图 3 中 76- 1 井), 与孤南及渤南洼陷沙河街组三段生油岩的生物标志物相似, 反映了断陷中期淡水湖盆沉积环境。

根据生物标志物参数(表 3)可以判断垦 73- 1 井、垦 76x3 井为第一类原油; 垦 76- 1 井、垦 24- 1 井、垦 24- 5 井、垦 71- 41 井为第二类原油; 垦 112- 1 井、垦 112- 2 井表现出混合的特征。所有的

油样均为成熟油,其 C_{29} 甾烷 $20S/(20S+20R)$ 值为 $0.37\sim 0.45$, $\beta\beta/(\beta\beta+\alpha\alpha)$ 值为 $0.35\sim 0.52$ 。根据前人对沾化洼陷的研究,本区原油对应的生油岩成熟度约为 $R_o.0.7\%$ ~ 1.0% ,埋藏深度应大于 $3\,500\text{ m}$ 。

因此,依据地化及地质的综合分析结果可以判断垦西-罗家油田的原油分别来自于渤南洼陷的沙河街组第三段、第四段生油岩。

4 稠油成因与成藏机制

4.1 稠油成因

决定原油性质的因素很多,主要可分为两大类,即原生因素和次生因素。原生因素是指有机质的性质和沉积环境,表现在生油母质干酪根的类型上。此外,有机质的成熟度也有着明显的效应,随着成熟度的增加,原油密度越来越低。然而,一旦原油形成,在排驱、运移及聚集过程中必然会经历很多物理和化学的次生过程,这些过程将不同程度地改变原油的性质,甚至完全掩盖原生因素的影响。次生因素主要包括水洗、生物降解、重力分异、再运移和天然脱沥青作用。这些作用常常互相关联,共同作用,其结果或相同或相反,以致于难以区分,稠油的形成就是一例。水洗及生物降解作用常常是伴生的,水洗带走易溶于水的烃类(首先是芳香烃,其

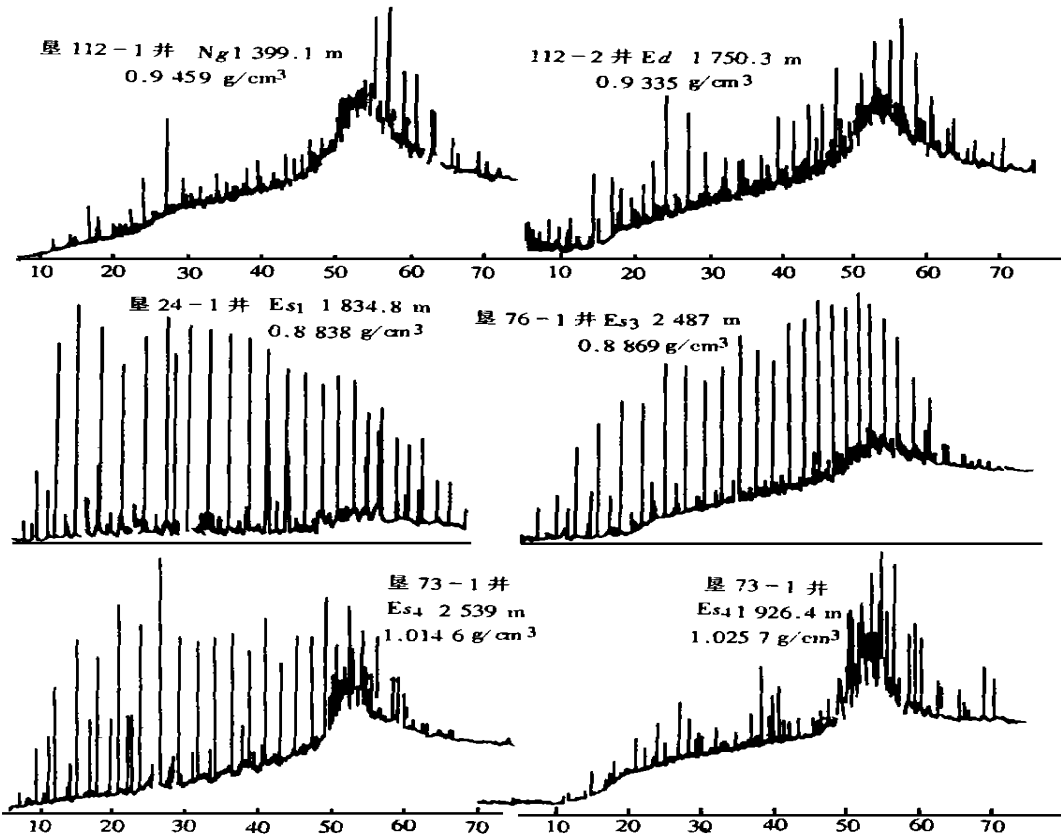


图 3 垦西油田原油代表性色谱图

次是低分子量正构烷烃);生物降解过程中,则各类化合物依次被微生物消耗,首先是低分子量正构烷烃,其次是芳香烃、高分子量正、异构烷烃(蜡),在遭受严重降解的原油中,只残留高分

子量的环烷烃(图3)。这两种作用的结果都会使轻质组分减少,重质组分增加,从而造成原油密度及粘度逐渐增大形成稠油。这是稠油形成的最重要、最普遍的原因。重力分异和再运移也会使原油密度及粘度增大,但不是形成稠油及特稠油的原因。

中国东部的重质原油一般有三种地质成因:第一种是盆地中心下第三系生油岩形成的原油沿断裂带和不整合面向上和向外运移造成。前者油气的分布受断裂的控制,断裂出现的层位越高,油层出现的层位越高;后者位于隆起边缘的浅层,易受降解作用而形成重油藏。第二种成因是由于盆地后期的构造抬升,致使早期形成的古油藏接近地表,风化作用使盖层遭受不同程度的破坏,油藏中轻烃损失而形成重油或超重油,第三种可能为直接受底水作用形成的重油,这类原油具有密度下大上小,有时顶部有气顶的特点。

本区稠油的形成与这三种作用都有关系,但各层系中的原油有着不同的经历。第一类超稠油主要与后期内化作用有关;第二类稠油主要与底水作用有关。而运移过程对这两类稠油的形成都有影响。

4.2 成藏机制

垦西-罗家地区与孤岛凸起一样,是油气运移的指向区。渤南洼陷的沙河街组四段源岩在东营组沉积初期大量生成并排出原油,这些原油从洼陷深部主要沿不整合面,穿过断层运移到沙河街组四段圈闭。其中轻的组分,包括由于压力下降,从油中释放出来的烃类气体聚集在断块的高部位,甚至可以沿着断层(主要是垦西大断层)继续向上,聚集在上部层位的圈闭中。由于本区在东营组二段末期经历了长期的抬升,断层活动强烈,古流体活跃,沙河街组四段油藏原油遭受了普遍的强烈的次生改造,形成了第一类稠油及超稠油。构造高部位24断块多为油水同层、含油水层,也说明油气曾沿断层逸散。

沙河街组三段源岩在馆陶组沉积期大量生成并排出原油,沿着沙河街组一段与沙河街组三段之间不整合面,穿过断层运移到从沙河街组三段直至馆陶组的圈闭中聚集。在断层封闭性差、储层浅的部位,原油遭受生物降解和水冲洗及氧化,尤其是馆陶组河流相沉积物中低矿化度水(1 000~5 000 mg/l)中细菌的活动使原油遭受了普遍的强烈的次生改造,形成了第二类稠油。

5 结论

(1) 垦西油田有大面积、多层系的稠油油藏。根据稠油的物理性质可分为两类:第一类以高密度、高粘度、高含硫、高凝固点为特征,主要产于沙河街组四段储层;第二类稠油以高密度、高粘度、高含硫、低凝固点为特征,主要产于馆陶组。

(2) 垦西油田稠油从馆陶组直至沙河街组四段都有分布,最大埋深达2 400 m。以深层沙河街组四段含稠油面积最大,向上逐渐减小。

(3) 不同层系中的原油物性变化明显,从馆陶组到沙河街组四段,原油密度及粘度由中 $\rightarrow$ 低 $\rightarrow$ 高、凝固点增高、含硫量突变。

(4) 第一类稠油以 $Pr/Ph < 0.8$ 、伽马蜡烷指数 > 0.3 、 C_{29} 甾烷 $20S/(20S+20R)$ 值大于 0.35, 及 C_{35} 藿烷 $> C_{34}$ 藿烷 为特征;第二类稠油以 $Pr/Ph > 0.8$ 、伽马蜡烷指数 < 0.3 、 C_{29} 甾烷 $20S/(20S+20R)$ 值高(0.32~0.50) 为其特色。油岩对比表明垦西油田的原油分别来自于渤南洼陷的沙河街组三段、四段生油岩。

(5) 垦西油田有两个成藏期和原油降解期。沙河街组四段生成的原油在东营组沉积期运

移, 主要在沙河街组四段储层成藏并遭受普遍的次生改造, 形成第一类稠油。沙河街组三段生成的原油在馆陶组沉积末期, 在沙河街组三段直至馆陶组成藏并遭受降解, 形成第二类稠油。

参 考 文 献

1 王启军, 陈建渝. 油气地球化学. 武汉: 中国地质大学出版社, 1998. 327
2 王秉海, 钱凯, 主编. 胜利油区地质研究与勘探实践. 北京: 石油大学出版社, 1992. 357
3 Philp R P. 化石燃料生物标志物. 傅家谟, 盛国英, 译. 北京: 科学出版社, 1987. 137~ 181

ORIGIN OF HEAVY OILS IN KENXI-LUOJIA OIL REGION

Chen Jianyu Li Shuifu

(China University of Geosciences, Wuhan)

Tian Bo Wei Shiping Yang Xiaomin

(Gudao Oil Producing Company, Shengli Oilfields, Dongying, Shandong)

Abstract

Water flushing and biodegradation are the most important and most common cause of the formation of heavy oils. The degrees of water flushing and biodegradation mainly depend on the distribution of fractures and unconformities within a basin, the degree of the basin's post-stage uplift and bottom water activities. The first kind of heavy oil in Kenxi oil region, resulted from basin uplift and primary oil pool weathering, is characterized by high density, high viscosity, high content of sulphur and high solidifying point; the second kind of heavy oil, resulted from active bottom water and biodegradation, is characterized by high density, high viscosity, high content of sulphur and low solidifying point.

勘 误

我刊 1998 年第 2 期刊出的《二氧化碳——中国东部中、新生代盆地的重要资源》一文图 4 标注的文献序号[4], 误排为[3], 特作更正, 并致歉意。

本刊编辑部
1998 - 09 - 09