

# 中东碳酸盐岩油田沥青质析出沉积和油井解堵增产新技术研究与实践

翟广福, 刘 晖, 戴卫华, 罗文生, 陈培元

中海石油国际能源服务(北京)有限公司, 北京

收稿日期: 2025年2月22日; 录用日期: 2025年5月29日; 发布日期: 2025年6月10日

## 摘 要

论文研究了中东B油田碳酸盐岩储层沥青质析出沉积问题及其解堵增产新技术。研究发现, B油田由于长期衰竭开发导致地层压力下降, 进而引发沥青质析出沉积, 堵塞储层孔隙, 造成油井产量下降。论文通过分析储层微观孔隙结构、沥青质微观状态以及原油和沥青质组分, 结合温度和压力影响分析, 确定了沥青质析出沉积的主要原因和影响因素。在此基础上, 筛选出高效无毒稳定的有机溶剂, 并提出了“有机溶剂浸泡 + 酸化”的复合增产措施新技术, 现场应用取得了较好的增产效果。

## 关键词

碳酸盐岩, 沥青, 析出沉积, 孔隙结构, 有机溶剂, 增产措施

# Research and Practice on Asphaltene Precipitation and Stimulation of Carbonate Reservoirs in Middle East

Guangfu Zhai, Hui Liu, Weihua Dai, Wensheng Luo, Peiyuan Chen

CNOOC International Energy Services Limited, Beijing

Received: Feb. 22<sup>nd</sup>, 2025; accepted: May 29<sup>th</sup>, 2025; published: Jun. 10<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

The paper investigates the issue of asphaltene precipitation and deposition in the carbonate reservoirs of Oilfield B in the Middle East, as well as a new technology for well stimulation and production enhancement. The study reveals that prolonged depletion-driven development in Oilfield B has led to a decline in formation pressure, triggering asphaltene precipitation and deposition, which blocks

文章引用: 翟广福, 刘晖, 戴卫华, 罗文生, 陈培元. 中东碳酸盐岩油田沥青质析出沉积和油井解堵增产新技术研究与实践[J]. 石油天然气学报, 2025, 47(2): 159-166. DOI: 10.12677/jogt.2025.472019

reservoir pores and reduces well productivity. By analyzing the microscopic pore structure of the reservoir, the microstate of asphaltenes, and the composition of crude oil and asphaltenes, combined with the effects of temperature and pressure, the primary causes and influencing factors of asphaltene deposition were identified. Based on these findings, a highly efficient, non-toxic, and stable organic solvent was selected, and a novel composite well stimulation technology combining “organic solvent soaking + acidizing” was proposed. Field applications have demonstrated significant production enhancement.

## Keywords

Carbonate, Asphaltene, Precipitation and Deposition, Pore Structure, Organic Solvent, Stimulation Measures

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

## 1. 引言

中东地区碳酸盐岩油藏储量丰富[1] [2], 沥青质析出沉积问题普遍存在[3]-[10], 该研究针对 B 油田的具体情况提出了相应的解堵增产技术, 对于提高油田采收率具有重要的实际意义。

## 2. 油田简介

B 油田是中东地区一个典型的大型碳酸盐岩构造边水油藏, 该油田于 20 世纪 70 年代投入生产, 已有超过 40 年的生产历史。地质储量约 47 亿桶, 油藏埋深 3650~4200 m, 主要开发层位是上白垩纪 M 组。原始地层压力为 6300 psi, 泡点压力 2600 psi, 地层原油粘度 0.65~1.03 mPa·s。由于油田天然能量弱, 长期衰竭开发, 导致地层压力下降大, 很多油井产量大幅下降甚至停喷, 油田自然递减率高达 20%。在油井作业和生产中, 经常在油井管柱、生产管线中发现沥青的现象, 见图 1。说明沥青质在井下或地层的析出沉积是油井产量下降或者停喷的主要原因。然而针对多口关停井及低产井进行了常规的酸化措施, 但增产效果不明显。



Figure 1. Asphalt deposition found in production tubing and well flowlines

图 1. 油井生产管柱和单井管线发现的沥青沉积

## 3. 研究方法

首先通过调研国内外文献, 了解沥青质析出和沉积的可能影响因素和防治方法。其次通过研究油田

储层微观孔隙结构和沥青质的微观状态,探索储层微观孔隙结构对沥青质沉积的潜在影响。第三,通过原油和沥青质的组分分析,研究其对沥青质析出的影响。第四,在相关实验数据基础上,利用专业软件分析温度、压力和组分变化等因素对沥青质析出的影响。第五,通过实验筛选出合适的有机溶剂,并提出合理的增产措施新技术。最后针对各种生产动态规律的油井分类进行现场增产措施试验并总结分析和推广应用,形成一套适合油田特点的沥青质析出和沉积的防治新技术。

## 4. 研究成果

### 4.1. 储层微观孔隙结构研究

B 油田碳酸盐岩储层主要为台内滩(生屑滩)相形成的颗粒灰岩,其次为泥晶生物灰岩以及生物泥晶灰岩。岩心观察表明储集空间类型主要有溶蚀-孔洞型、基质孔隙型、微裂缝-孔隙型三种类型,主要特征如下:

(1) 溶蚀-孔洞型:台内礁滩相以孔洞型储层为主,连通性好,厚壳蛤灰岩发育小型的溶蚀孔洞,厚壳蛤间多为生屑充填,储集空间以粒间溶孔为主,这类孔隙往往连通性较好,容易为液态烃充注,为I类有利储层。

(2) 基质孔隙型:主要存在于开阔潮下亚相,岩性为泥晶生屑灰岩和生屑泥晶灰岩,以粒内孔和生物体腔孔为主,后期表生暴露改造时可形成基质溶蚀微孔,孔隙度较高,但喉道较小,故渗透性较差,为II类差储层。

(3) 微裂缝-孔隙型:微裂缝通常发育在低孔隙度区域,受微裂缝的影响,沿裂缝发育溶蚀孔隙,但微裂缝仅局部发育,对储层物性未起到改善作用,为III类极差储层。

在常规铸体薄片、扫描电镜(SEM)、透射电镜(TEM)和毛管压力的基础上,首次利用了加压毛管压力资料(MICP)对以上三类储层确定了微观孔隙结构,实验结果证实了I类和II类储层的孔喉均存在双峰分布模式,分别对应管状喉道(喉径 5~50  $\mu\text{m}$ )和片状喉道(喉径 0.2~2  $\mu\text{m}$ ),见图2。这种双峰模式影响了储层渗流规律和原油沥青质的稳定性,由于片状喉道喉径小,渗流阻力大,当压力下降到一定程度,沥青质析出后更容易被片状吼道捕捉,从而沉积堵塞渗流通道,造成油井产量大幅下降。

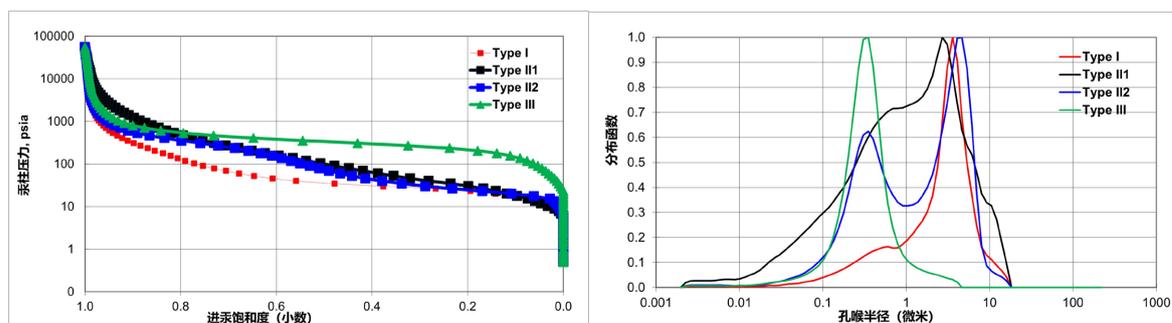
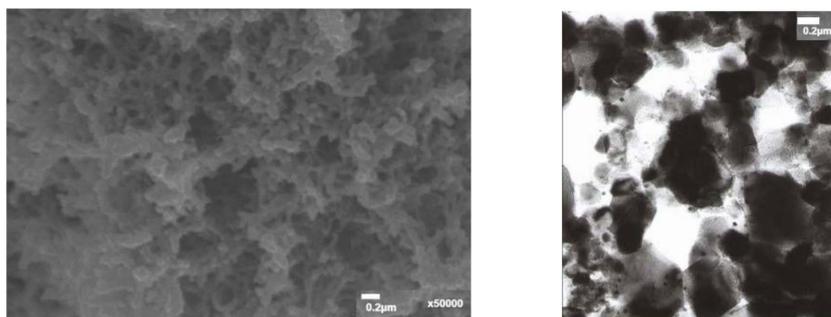


Figure 2. Three types mercury injection capillary pressure curves and pore-throat radius distribution of carbonate reservoirs  
图2. 三类碳酸盐岩储层压汞曲线和孔吼半径分布图

### 4.2. 沥青质微观状态分析

通过室内实验观察,沥青质样品是石蜡非晶体结构包裹的地蜡微晶结构,结合存在于孔隙中,结构之间在 0.2~0.5  $\mu\text{m}$  之间,粒径在 1~2  $\mu\text{m}$  之间,见图3。由储层微观孔隙结构研究结果可知,储层片状喉道的喉径在 0.2~2  $\mu\text{m}$  之间,与沥青质粒径基本一致,说明沥青质沉积物是完全可以堵塞储层片状吼道的。对于管状喉道,因为其喉径在 5~50  $\mu\text{m}$  之间,所以沥青质不易沉积在管状喉道中。



**Figure 3.** Microscopic structure analysis of asphaltenes (left: SEM, right: TEM)  
**图 3.** 沥青质微观结构分析(左图 SEM, 右图 TEM)

#### 4.3. 原油和沥青质组分影响分析

Bunger 等人认为导致沥青质缔合的因素是其较高的分子量、极性、芳香度及分子对称性等, 主要受到沥青质含量和胶质浓度影响[11] [12]。沥青质是原油中极性最强的部分, 这些极性物质以单体形式存在。当浓度较高时, 就可能以氢键或电子给体—受体形式相结合而形成沥青质聚集体的超分子结构, 甚至沉积出来。在石油胶体体系中胶质是沥青质必不可少的胶溶剂, 石油混合物存在临界胶质浓度。当胶质含量低于该浓度时, 沥青质颗粒将沉淀, 高于该浓度时, 则不沉淀。

针对 B 油田原油和沥青样品进行了组分分析, 结果表明原油样品中烃类含量平均 85.4% (其中饱和烃 57.2%, 芳香烃 28.2%), 沥青质含量平均 9.3%, 胶质含量平均 5.3%。沥青样品中沥青质含量平均 27.8%, 胶质含量平均 6.6%, 沥青质含量较原油样品增加了 18.5%, 而胶质含量变化不大, 见表 1。由此可知, B 油田沥青质浓度达到 27.8% 时将会发生沥青质析出。

**Table 1.** Analysis results of crude oil and asphaltene sample composition

**表 1.** 原油和沥青样品组分分析结果

样品名称	API 度	地面粘度/mPa.s	含蜡量/%	沥青质/%	胶质/%
油样 1	27	75.3	3.2	9.48	5.61
油样 2	27.5	78.9	2.8	9.52	5.32
油样 3	26.5	81.3	3.6	8.78	4.89
垢样 1			2.4	32.8	5.70
垢样 2			1.8	28.5	7.4
垢样 3			2.2	22.1	6.6

#### 4.4. 温度和压力影响分析

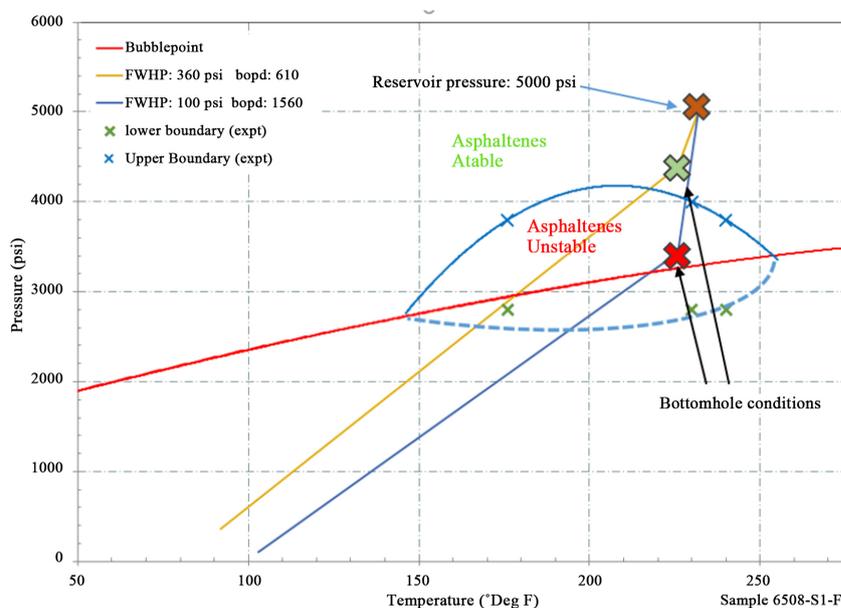
沥青质在原始油藏条件下通常是稳定的, 但在生产过程中, 由于压力、温度及原油组分的变化, 沥青质会变得不稳定而析出[11]-[14]。国内外关于沥青质析出沉积的预测研究较多[15]-[17], 但考虑因素相对单一。Multiflash 沥青质软件是贝克休斯与 Expro UK Ltd 基于 Redlich-Kong-Soave (RKS) 状态方程[18] 共同研发的, 其优点是不但能模拟温度和压力对沥青质析出的影响, 还添加了描述沥青质分子关联及其与树脂溶解作用的附加项, 所需数据如下:

- 油藏流体的组分分析数据(PVT 分析数据)
- 原油中的沥青质含量和树脂与沥青质的比例, 通常通过 SARA (饱和烃、芳烃、树脂、沥青质) 表征确定
- 一到两组沥青质絮凝的沉淀条件

- 泡点压力用于“调校”石油馏分特性

以上数据均通过实验室取得，模拟结果如图 4 所示，在某些压力和温度条件下，沥青质从溶液中析出为固体颗粒的区域称为沥青质沉积包络图(APE)。随着油藏压力的下降，流体将越来越接近并进入到 APE 区域，从而析出沥青质并沉积在储层或者管柱上。

通过模拟油井生产时的压力和温度曲线路径，可以预先评估流体进入 APE 的风险，并通过优化工作制度来防止沥青质在储层的析出和沉积，但这样做往往会以牺牲产量为代价。以某井为例，井口压力在 360 psi 时，储层没有沥青质析出的风险，但是在该工作制度下产油量仅 610 bbl/d，比井口压力为 100 psi 时低 950 bbl/d 严重影响油井产量，见表 2。



**Figure 4.** Asphaltene deposition envelope and pressure-temperature variation paths under different production parameters in oilfield B

**图 4.** B 油田沥青质沉积包络图与不同工作制度下油井压力和温度变化路径图

**Table 2.** Comparison of production rates of a well under different production parameters

**表 2.** 某井在不同工作制度下的产量对比

生产制度	井口压力/psi	井底压力/psi	地层压力/psi	生产压差/psi	产油量/bbl/d
1	100	4390	5000	610	610
2	360	3400	5000	1600	1560

#### 4.5. 油井解堵新技术提出

解决沥青质沉积的方法一般包括机械和化学方法[12][19][20]。对于机械处理，最普通的程序是机械刮削、清洗井下管，但这无法解除近井地带储层污染。化学方法包括芳烃溶剂和沥青质分散剂等有机溶剂，该方法需要针对沥青质组分及其它要求进行实验筛选确定。

考虑到 B 油田井底流压已经处于沥青质析出区域，近井地带储层存在着沥青质沉积的潜在风险，因此选择了化学方法来解决沥青质沉积问题。通过大量室内实验研究，筛选出了适合 B 油田的沥青质解堵的有机溶剂，对沥青质沉淀的溶解率高达 95% 以上，且无毒，性质稳定，完全适用于当地恶劣的自然条件，尤其是可以忍耐夏季高达 50℃ 的高温，见表 3。

**Table 3.** Evaluation experiment of organic solvent dissolution of asphaltenes  
**表 3.** 有机溶剂溶解沥青质堵塞物评价试验

样品	溶解前质量/g	溶解后质量/g	溶解率/%	备注
1	2.54	2.45	96.61	90℃, 2 h
2	2.11	2.01	97.33	

为了提高措施成功率，提出了“有机溶剂浸泡 + 酸化”的复合增产措施新技术，其中有机溶剂浸泡目的是解除储层和井筒中沥青质沉积带来的有机污染，酸化是为了解除储层中潜在的无机污染。

### 5. 实施效果

为了使措施更具有针对性，结合储层地质特点和生产井动态规律，将油井分成了 5 种典型类型，见表 4，并分别进行了现场试验，以确定适合该新技术的油井类型和原因。

现场实践结果表明，针对第 1 类和第 4 类油井，效果显著，第 5 类也有一定效果，而第 2 类和第 3 类效果不明显，主要原因如下：

(1) 第 1 类和第 4 类生产井自然递减率大、产量低，原因为沥青质析出沉积导致近井地带的储层污染严重，措施有效解除了沥青质析出沉积带来的储层污染。这两类油井动态表现不一样主要受储层微观孔隙结构影响。第 1 类储层为溶蚀-孔洞型，该类储层以喉道半径大的管状喉道为主，沥青质析出后容易随原油排出地层，此时产量下降主要受地层压力下降影响，该阶段持续时间长，直至沥青质沉积发生在占比较少的片状吼道导致产量很低。第 2 类储层主要为基质孔隙型，该类储层喉道半径小的片状喉道占比大，一旦地层压力下降，就会导致沥青质析出并迅速大量沉积而导致产量在短时间内大幅下降。

(2) 第 5 类生产井自然递减率小，且产量较低，主要是因为储层为基质孔隙型，物性较差。该类井地层压力较高，沥青质沉积并不明显，但措施仍然有一定增产效果，主要原因是储层岩性为灰岩，酸化对于该类储层物性有改善作用。

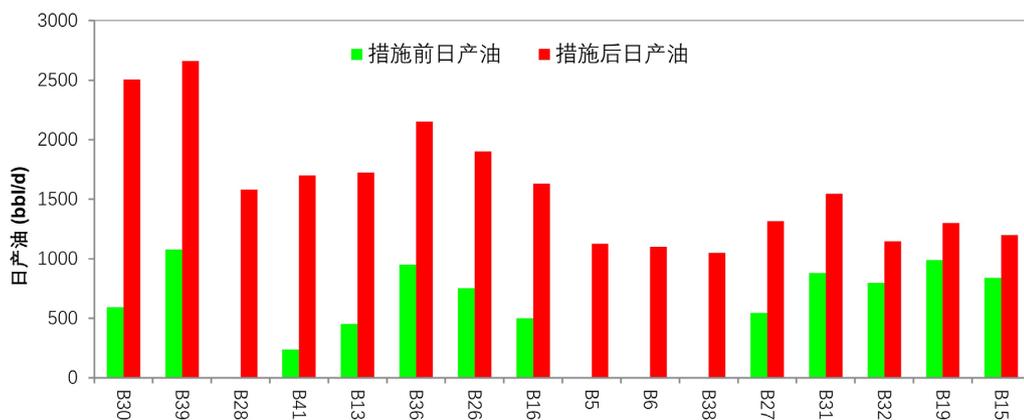
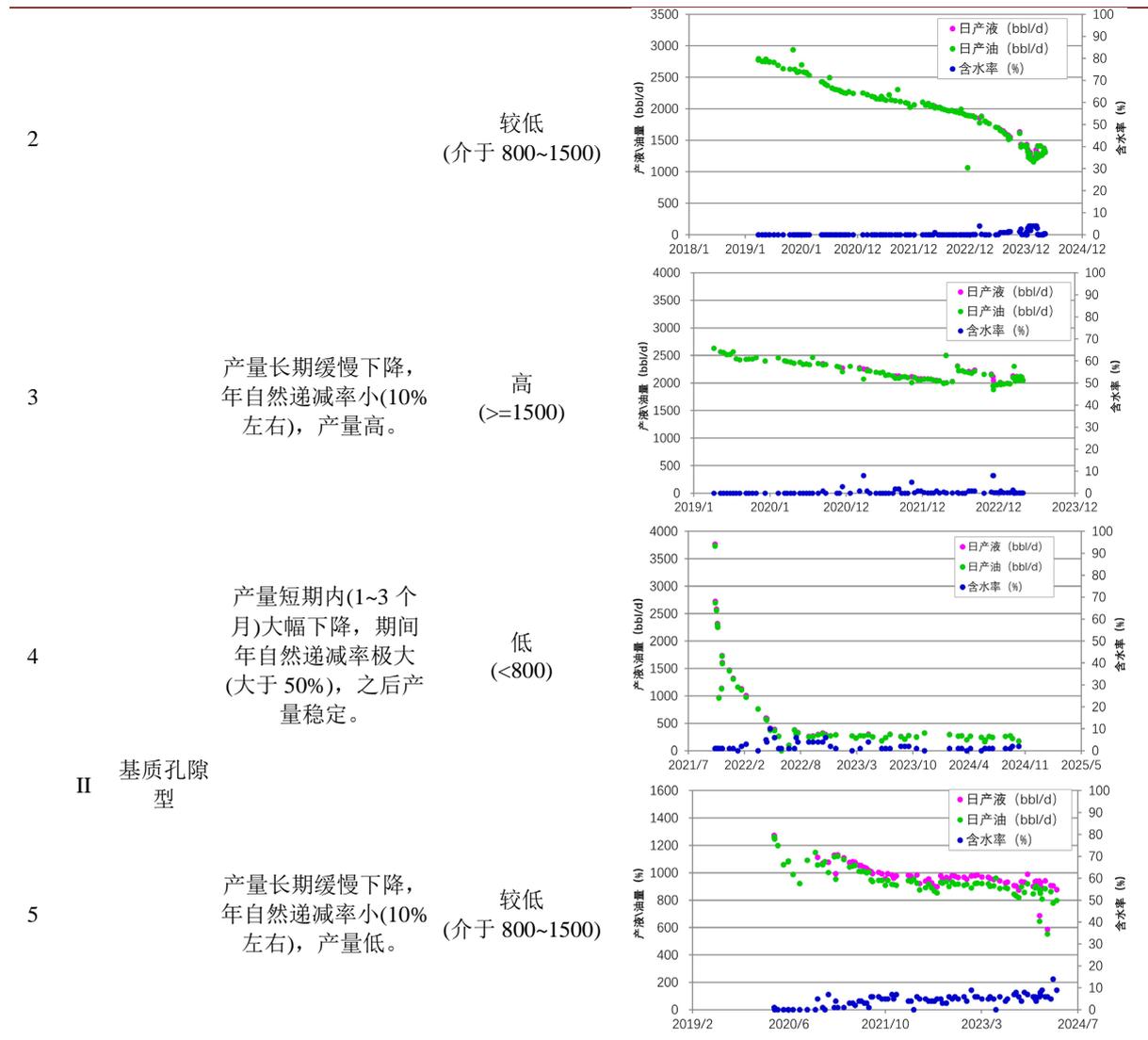
(3) 第 2 类和第 3 类措施效果不明显，原因是第 3 类自然递减率小、产量高，没有沥青质沉积污染的问题。第 2 类虽然自然递减率大，但如(1)中所分析，该类井主要受地层压力下降影响，沥青质还未对储层造成明显污染。另外值得一提的是，酸化对于第 2 类和第 3 类生产井物性改善作用不大，主要是因为这两类油井储层物性好，作业时酸液会沿着高渗通道(贼层)突进导致酸液与储层接触不充分，而第 5 类(基质孔隙型)储层相对均质，酸液可以均匀的与储层发生反应从而提高物性。

在该研究成果的指导下，2024 年实施了 16 口油井“有机溶剂浸泡 + 酸化”的复合增产措施，均获得成功，初期日增油高达 1.9 万桶/天，见图 5，当年累计增产原油 160 万桶。

**Table 4.** Classification and patterns of typical production dynamics in production wells of oilfield B  
**表 4.** B 油田生产井典型生产动态分类和规律

分 类	储层 分类	储层 类型	动态表现和年自然递 减率	措施前产量 bbl/d	典型井生产曲线
1	I	溶蚀 - 孔洞型	产量长期(2~3 年) 快速下降，期间年 自然递减率大(介 于 20%~50%)，之 后产量稳定。	低 (<800)	

续表



**Figure 5.** Application effect of the “organic solvent soaking + acidizing” composite deblocking and production enhancement technology  
**图 5.** “有机溶剂浸泡 + 酸化”复合解堵增产新技术应用效果

## 6. 结论

1) 沥青质析出和沉积对于中东碳酸盐岩油藏是个比较普遍的问题,对油田正常开发生产造成了极大的挑战。

2) 沥青质的析出和沉积主要受原油组分、压力和温度等变化的影响。B 油田由于长期衰竭开发,地层压力下降大,部分油井在生产过程中进入到沥青质沉积区域(APE)从而发生了沥青质的析出和沉积。

3) 由于 B 油田储层微观孔隙结构存在“双峰”分布模式,沥青质析出后沉积在孔喉半径小的片状喉道中,导致储层受到污染,油井产量下降。

4) 在沥青质组分分析的基础上,通过大量实验筛选出了适合油田特点、无毒、性质稳定、耐高温的沥青质解堵有机溶剂,提出了“有机溶剂浸泡 + 酸化”的复合解堵增产新技术。

5) 实践证明该技术结合精准动态分析,可以有效清除储层存在的沥青质沉积造成的有机污染和无机污染,油井产量提高效果明显。然而该技术只能短期内解决沥青质析出和沉积问题,注水恢复地层压力才能根本性解决。

## 参考文献

- [1] 穆龙新, 范子菲, 许安著. 海外油气田开发特点、模式与对策[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 157-164.
- [2] 宋新民, 李勇. 中东碳酸盐岩油藏注水开发思路与对策[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 1-11.
- [3] 何延龙, 余跃惠, 蒲春生, 等. 伊朗北阿扎德干油田沥青质沉积特征[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2014, 29(2): 1-7.
- [4] 曹松, 杜政学, 吴仲岩, 等. 伊拉克 H 油田原油沥青质沉积趋势预测及分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(33): 36-40.
- [5] 宁俐. 伊朗 Y 油田轻质油沥青质沉积的预测分析[J]. 化工管理, 2014(10): 147-148.
- [6] 刘俊凯, 徐鑫, 呼苏娟, 等. 沥青质沉积方式对储层渗透率的影响[J]. 大庆石油地质与开发, 2023, 42(2): 91-98.
- [7] 赵凤兰, 鄢捷年. 原油沥青质沉积引起储集层损害的室内评价[J]. 石油勘探与开发, 2023, 30(2): 100-103.
- [8] Limanowka, W.A.A. and Voytechek, M.J.M. (1999) Asphaltene Deposition Problems in Oil Industry with Focus on Electric Submersible Pump Applications. 1999 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, 3-6 October 1999, SPE Paper 56662. <https://doi.org/10.2118/56662-ms>
- [9] 张伟森, 尹洪超, 等. 渤海油田井筒沥青质沉积评价及防治研究[J]. 油气勘探与开发, 2023, 41(2): 106-111.
- [10] 何汉平, 黄健林, 赵凤兰, 等. 伊朗雅达油田完井测试作业中沥青质析出分析[J]. 科技导报, 2014, 32(21): 52-55.
- [11] Bungler, J.W., et al. (1994) Thermodynamic Approach to the Study of Asphaltene. Preprints, American Chemical Society Division of Petroleum Chemistry, 3.
- [12] 李美霞. 沥青质沉积问题文献综述[J]. 特种油气藏, 1996, 3(3): 59-62.
- [13] 郭永伟, 张国威, 金萍. 油藏开发中沥青质沉积机理及理论研究进展[J]. 油田化学, 2024, 41(1): 179-190.
- [14] 宋江峰. 原油中沥青质的稳定性及其影响因素[J]. 油田化学, 2023, 40(4): 627-635.
- [15] Nghiem, L.X., Kohse, B.F., Farouq Ali, S.M., et al. (2000) Asphaltene Precipitation: Phase Behaviour Modelling and Compositional Simulation. SPE Asia Pacific Conference on Integrated Modelling for Asset Management, Yokohama, April 2000, SPE-59432-MS.
- [16] 何行范, 李士伦. 沥青质沉积的测定和模型化[J]. 天然气工业, 2003, 23(2): 78-81.
- [17] 秦晓光, 敬加强, 骆畅, 等. 原油沥青质沉积测试分析及预测[J]. 油气田地面工程, 2011, 30(5): 18-20.
- [18] Soave, G. (1972) Equilibrium Constants from a Modified Redlich-Kwong Equation of State. Chemical Engineering Science, 27, 1197-1203. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(72\)80096-4](https://doi.org/10.1016/0009-2509(72)80096-4)
- [19] Schantz, S.S. and Stephenson, W.K. (1991) Asphaltene Deposition: Development and Application of Polymeric Asphaltene Dispersants. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, October 1991, SPE-22783-MS. <https://doi.org/10.2118/22783-ms>
- [20] 刘灏亮, 孙铎, 张新宇, 等. 沥青质沉积化学防治技术研究[J]. 内蒙古石油化工, 2017(5): 63-64.