

文章编号: 1001- 6112(2008)02- 0212- 05

# 苏北盆地溱潼凹陷草舍油田 CO<sub>2</sub> 混相驱技术研究

俞凯, 刘伟, 陈祖华

(中国石油化工股份有限公司 华东分公司, 南京 210011)

**摘要:** 苏北盆地溱潼凹陷草舍油田泰州组油藏是一个复杂断块油藏, 边界断层遮挡性较好, 内部小断层则基本不封闭, 储层连通性较好。室内实验注入 CO<sub>2</sub> 对泰州组地层原油起到了明显的膨胀降粘作用, 满足 CO<sub>2</sub> 混相驱的要求。注气前泰州组油藏水驱井网存在开发层系划分较粗、层间矛盾严重、局部地区井网不完善、平面开采不均衡、纵向油层动用程度差异等问题, 注入 CO<sub>2</sub> 后的动态监测表明, 注气井吸气剖面得到明显改善, 地层达到最小混相压力, 原油重质组分被动用, 整个区块产量稳定并初步见效。

**关键词:** CO<sub>2</sub> 混相驱; 草舍油田; 溱潼凹陷; 苏北盆地

中图分类号: TE341

文献标识码: A

## STUDY OF CO<sub>2</sub> MISCIBLE FLOODING TECHNIQUE IN THE CAOSHE OIL FIELD, THE QINTONG SAG, THE NORTHERN JIANGSU BASIN

Yu Kai, Liu Wei, Chen Zuhua

(Southeastern Branch, SINOPEC, Nanjing, Jiangsu 210011, China)

**Abstract:** The Taizhou Formation reservoir in the Caoshe Oil Field of the Qintong Sag of the Northern Jiangsu Basin is a complex fault block reservoir. Border faults work as good barrier while internal ones are unbounded, resulting in communication of reservoirs. Injection of CO<sub>2</sub> in laboratory experiment obviously expands crude oil and reduces viscosity, hence is qualified for CO<sub>2</sub> miscible flooding. Before gas injection, there are many problems with flooding pattern of the Taizhou Formation reservoir. For example, the division of development series is too simple; interlayer contradicts with each other; well pattern in some region is not perfect; plane productions are unbalanced; and vertical production degrees are different, et al. Dynamic monitoring after CO<sub>2</sub> injection has proved that, gas entry profiles of gas injection well are improved; formation reaches the minimum miscibility pressure; heavy components in crude oils are produced; and production in the whole region is stable and advancing.

**Key words:** CO<sub>2</sub> miscible flooding; the Caoshe Oil Field; the Qintong Sag; the Northern Jiangsu Basin

CO<sub>2</sub> 混相驱是一种能够大幅度提高原油采收率的三次采油方法。20 世纪 60 年代至今, 我国在大庆、中原、华北、江苏、华东等油田相继开展了 CO<sub>2</sub> 驱研究和先导试验, 取得了一些成果和经验<sup>[1-4]</sup>。苏北盆地溱潼凹陷草舍油田泰州组油藏 CO<sub>2</sub> 混相驱提高采收率先导试验, 是中国石油化工股份有限公司油气田开发重大先导试验项目。经过 4 年多的探索和研究, 已初步形成了适合苏北复杂断块油藏 CO<sub>2</sub> 驱油配套工艺技术及现场可操作的流程, 包括气藏储量评价、CO<sub>2</sub> 驱室内实验模

拟、油藏工程方案优化设计、CO<sub>2</sub> 采集、净化处理与输贮工艺、注采工艺、防腐防垢、动态监测、开采规律与效果评价等技术。目前草舍油田泰州组油藏 CO<sub>2</sub> 混相驱已取得初步效果。

### 1 CO<sub>2</sub> 驱油适应性研究

草舍油田泰州组油藏位于苏北盆地溱潼凹陷断阶带, 是在深部隆起背景下被同生断层复杂化而形成的逆牵引背斜构造<sup>[5,6]</sup>。油藏埋深 2 900~3 050 m, 含油面积 0.7 km<sup>2</sup>, 地质储量 142 × 10<sup>4</sup> t,

收稿日期: 2007- 05- 28; 修订日期: 2008- 02- 21。

作者简介: 俞凯(1958—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事油田开发管理工作。E-mail: hdfliuwei@yahoo.com.cn。

可采储量  $34.1 \times 10^4$  t。1979 年发现并投入试采, 1990 年开展注水开发试验, 2005 年 7 月开始注 CO<sub>2</sub> 驱油先导试验。目前已有 4 口井投注 CO<sub>2</sub>, 累计注入  $2.3 \times 10^4$  t, 对应采油井已出现含水率下降、产油量稳中有升的见效趋势。

### 1.1 构造特征

草舍构造轴向北北西, 构造高点埋深自西南向东北变小, 北东向正断层自泰州凸起向溱潼凹陷将草舍构造分割成逐级下掉的高、中、低 3 个断阶, 即平面上的南、中、北断块。泰州组油藏位于南断块的高断阶, 由东向西依次发育小断块 iv-v, 也是油气的主要富集区(图 1)。

根据“旋回对比, 分级控制”原理和油层的发育分布情况, 可将草舍油田泰州组划分为 3 个油组、11 个小层, 其中主力油层为 8~10 小层。

### 1.2 断层封闭性

草舍油田泰州组油藏边界断层( iv, ㊸, F1, F2) 断距大于 100 m, 延伸远(大于 3 km), 起着封隔油藏和控制储层的作用; 内部次级断层南 1—南 7, 断距 20~100 m, 其中南 1—南 6 号断层由于断距小于主力油层厚度(储层厚度大于 60 m), 不能完全错开储层, 断块两侧储层仍可通过断层侧向沟通; 南 8 号断层断距大, 将断块两侧储层完全错开, 使南中(九)—2 断块封隔成独立断块(图 1)。

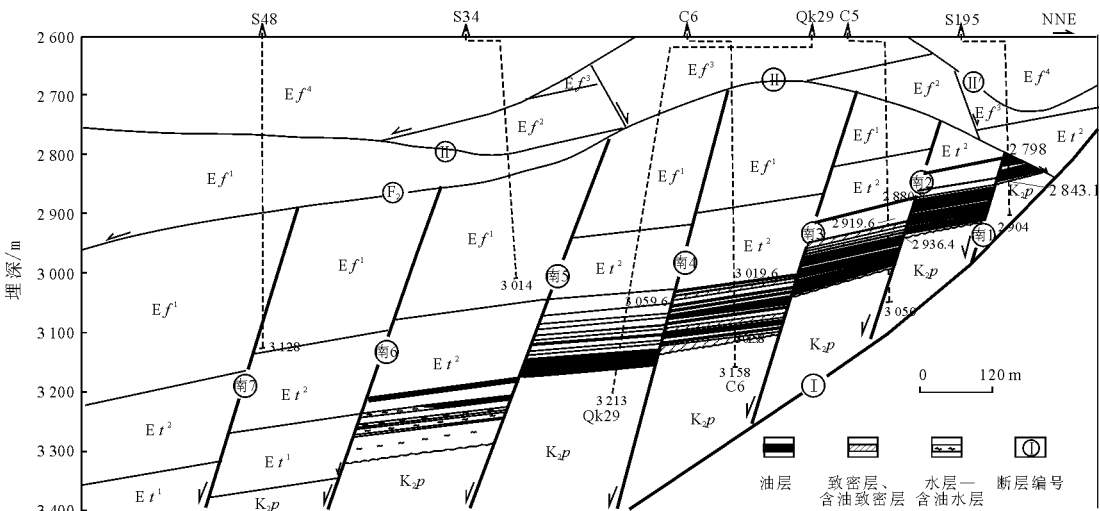
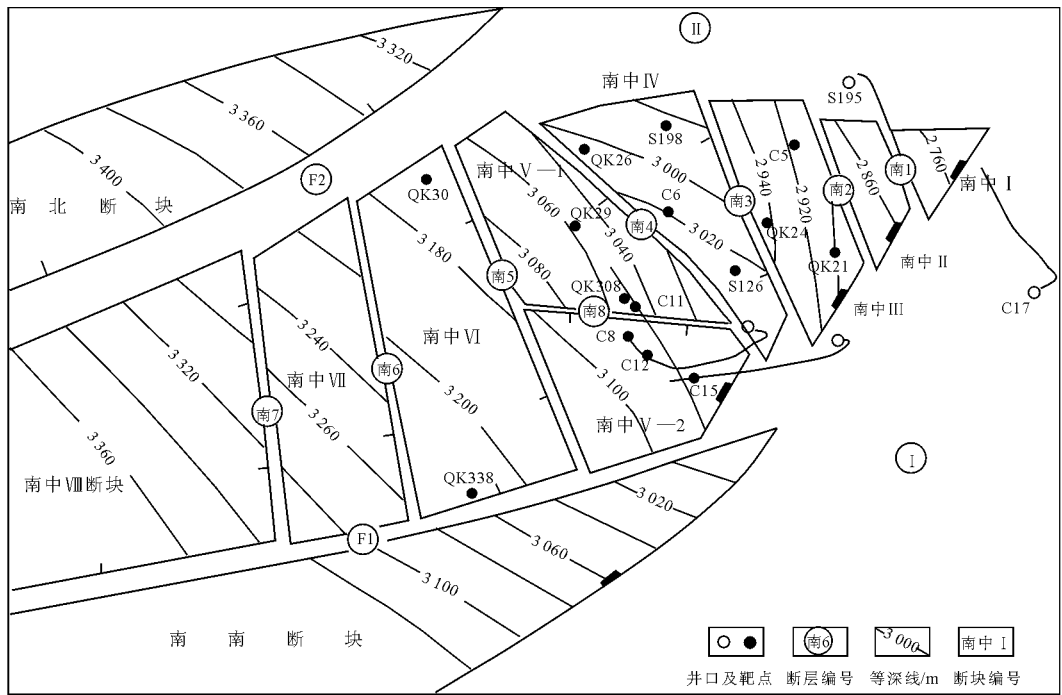


图 1 苏北盆地草舍油田泰州组油藏构造及油藏剖面

Fig. 1 Structure and profile of the Taizhou Formation reservoir in the Caoshe Oil Field in the Northern Jiangsu Basin

### 1.3 储层连通性

泰州组 I 油组为非主力油层, 层薄, 横向连通性较差或不连通; 主力油层 ㊸ ㊹油组厚度大, 除 C8 井所在的南中 (九)—2 断块外, 南中 iv—南中 (九)—1 断块之间连通性较好 (图 1)。

地层压力监测资料说明了断块间的连通关系。1979 年 S126 井 (南中 ㊸断块) 揭示的油藏原始地层压力为 35.9 MPa, 1985 年 C5 井 (南中 ㊹断块) 揭示的油藏地层压力为 27.3 MPa, 1986 年 C6 井 (南中 ㊸断块) 揭示的油藏地层压力为 25.6 MPa, 1990 年 S195 井 (南中 iv 断块) 揭示的油藏地层压力为 17 MPa, 1995 年 QK29 井 (南中 (九)—1 断块) 揭示的油藏地层压力为 15.4 MPa, 表明南中 iv—南中 (九)—1 断块是连通的; 相反, 1987 年南中 (九)—2 断块 C8 井揭示的油藏地层压力为 34.3 MPa, 与相邻断块的 C6 井相差 8.7 MPa, 也进一步证实了南中 (九)—1 与南中 (九)—2 断块是不连通的。

注水动态及示踪测试资料分析反映了储层间的连通关系。泰州组油藏自 1990 年就开始注水开发, 注水见效。见水动态特征表明, 泰州组储层无天然裂缝, 油藏低部位的 QK29, C11, C8, C15 等井因储层物性差而压裂投产, 但压裂缝延伸不长, 且与水线方向不一致, 对注气影响不大。对注气影响较大的是油藏中部的南中 ㊹断块, QK24 与 C18 井井距 255 m, 在长期注水开发过程中, 已形成 1~3 套高渗透层, 水淹层平均渗透率高达  $(113.55 \sim 358.90) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 导致注水示踪剂单向窜流, 突破时间只有 42 天, 日推进速度达 6.1 m/d (图 2), 是可能导致注

气后气窜的井层<sup>7</sup>。为此针对性地研究形成了注前注气井调剖, 注入过程中泡沫驱的防气窜预案。

### 1.4 原油性质

草舍油田原油性质属于陆相成因的石蜡基原油, 具有高含蜡、低硫、较高凝固点的特点, 且不同断块、不同含油层位的原油性质仍有较大差别。南中 ㊸断块 S198 井取样分析地层油密度为 0.8219 g/cm<sup>3</sup>, 粘度为 7.02 mPa·s, 饱和压力为 4.00 MPa。实验物理模拟研究结果表明, 注入 CO<sub>2</sub> 对泰州组油藏地层原油能起到明显的膨胀减粘作用。在目前的地层压力 (32 MPa) 下, 原油中的 CO<sub>2</sub> 摩尔百分数最高可达 71%, 原油体积最大可膨胀 1.51 倍, 粘度由 7.02 下降到 1.35 mPa·s。

### 1.5 油藏 CO<sub>2</sub> 驱适应性

据美国国家石油协会推荐的 CO<sub>2</sub> 混相驱筛选标准, 地层压力与最小混相压力之比大于等于 0.95, 原油粘度 10~12 mPa·s, 油藏温度小于 121 °C, 原油相对密度小于 0.9, 最低剩余油饱和度大于 0.25, 严重的层状非均质性或裂缝性油藏应避免采用 CO<sub>2</sub> 混相驱<sup>[8,9]</sup>。

草舍油田泰州组油藏原始地层压力为 35.9 MPa (3 065.0 m), 细管实验最小混相压力为 29.34 MPa, 注前实测油藏地层压力为 32 MPa; 油藏温度 110 °C, 小于美国国家石油协会推荐的上限温度; 地层相对原油密度小于 0.9, 剩余油饱和度 30%~50%。该油藏属于中—低渗油藏, 储层相对均质, 具有储量规模大、丰度高、注采井网较完善、井况较好、含水率较低、地层压力保持较好的特点。地层测试和注水开发生产中没有出现明显的裂缝性油藏特征, 满足 CO<sub>2</sub> 混相驱油的条件<sup>[8]</sup>。

## 2 水驱存在问题及方案设计

经过 20 多年的天然能量及注水开发, 草舍油田泰州组油藏已进入产量递减阶段, 水驱时的矛盾日渐突出, 主要表现为: 开发层系划分较粗, 自投入开发以来, 一直采用一套井网与阜一段合注合采, 层间矛盾突出, 一套井网无法有效开发 2 个油藏; 局部地区井网不完善, 泰州组油藏断块小而复杂, 2 条主控断层及次级断层附近油层有断缺, 导致各小层局部井网欠完善, 且注水井点少, 部分断块注入水难以波及, 油藏水驱井网控制储量  $65.3 \times 10^4$  t, 水驱井网储量控制程度仅 46%; 平面上开采不均衡, 边部南中 V 断块的稠化带, 块内无注水井且与高部位断块连通较差, 开发效果差, 主体部位南中 iv—㊸断块原油性质好, 处于主河道部位的高渗透

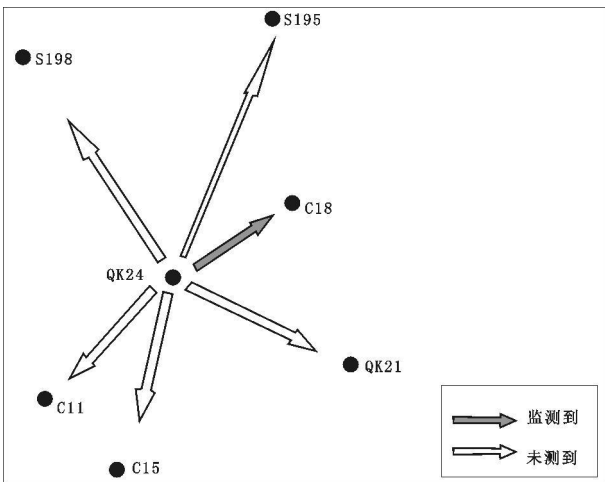


图 2 苏北盆地草舍油田泰州组油藏示踪剂试验注采井网分布

Fig. 2 Schematic layout of well pattern for tracer agent experiment of the Taizhou Formation reservoir in the Caoshe Oil Field in the Northern Jiangsu Basin

条带, 井网完善, 断块间连通性好, 注水开发效果较好; 纵向上油层动用程度存在差异, 注气前泰州组共有 4 口注水井, 吸水产液剖面资料显示, 泰州组和阜一段 2 个层系之间、泰州组内部各小层之间均存在一定的干扰。

针对水驱中的问题, 利用 CMG 软件, 对泰州组油藏 CO<sub>2</sub> 驱井网进行注入参数优化设计<sup>[10]</sup>, 优化了 5 套注采井网, 最终确定 CO<sub>2</sub> 驱井网为 5 注 10 采; 采取连续注气的方式, 注入 3 年, 累计注气  $6\ 840 \times 10^4\ \text{m}^3$ ; 注气期间油藏压力保持在 31 MPa 左右; CO<sub>2</sub> 驱效果评价期为 15 年, 截至评价期末, 草舍油田泰州组油藏 CO<sub>2</sub> 驱比水驱可提高采收率 17.23%, 含水率降低 21.75%。

### 3 应用现状

截至 2007 年 12 月, 泰州组先后有 5 口井注气。油藏累计产油  $32.31 \times 10^4\ \text{t}$ , 产水  $19.40 \times 10^4\ \text{t}$ , 注水  $62.63 \times 10^4\ \text{t}$ , 注 CO<sub>2</sub> 气  $2.3 \times 10^4\ \text{t}$ , 注采比为 1.04。

泰州组油藏 C8 井动态监测显示, 注气后吸气剖面得到明显改善。南中 (九)—2 断块的 C8 井注水时吸水剖面显示 7 小层不吸水; 2005 年 7 月开始注气, 累积注入 4 627 t, 注气后的吸气剖面显示 7 小层开始吸气, 而主力层 8, 9 小层吸气能力也明显增加。表明注入 CO<sub>2</sub> 后, 低渗储油层得到了进一步动用(图 3)。

对油藏注气前后的压力监测表明, 泰州组油藏注 CO<sub>2</sub> 后地层达到了混相压力<sup>[11]</sup>。2005 年 5 月

(注气前)对 C21 井进行二联作测试, 压力系数为 0.97, 2005 年 8 月对 C22B 井进行二联作测试, 压力系数为 0.994, 表明注 CO<sub>2</sub> 前油藏压力达到了 29.34 MPa 的混相压力。注气后, 2005 年 9 月对 C23 井进行测试, 压力系数为 1.41, 2006 年 9 月对 C8 井进行测试, 油藏中部深度(3 141.5 m)压力为 42.15 MPa。由此可见, 注气前后油藏压力均高于油藏所需的混相压力。

草舍油田泰州组油藏物性受构造高度控制, 在构造高部位原油物性相对较好, 粘度和密度较小; 在构造低部位由于存在层状弱边水, 原油氧化, 粘度和密度相对较高。注气后, 原油物性亦发生变化, 体现在密度略有下降和粘度增大趋势上; 原油初馏点也有所升高; 原油组分气相色谱分析说明, 随着注气时间的延长, 原油中产出的轻组分减少, 重组分增加, 说明 CO<sub>2</sub> 气驱后, 原油中的重组分已逐渐被动用(图 4)。

### 4 CO<sub>2</sub> 驱初步效果

泰州组 2005 年 7 月开始注气, 注气后整个区块产量递减趋势变缓, 趋于稳定。主要有以下几个采出特征<sup>[12]</sup>。

注气井组注采对应良好, 初步见效。高部位 iv—⑤断块储量  $78 \times 10^4\ \text{t}$ , 水驱时 30% 的井数占全区总产量的 77%, 目前尚未全面正常注气。低部位注气对应见效井 C11, C12, C15 并于 2006 年 3 月开始全面见效, 出现日产油上升的趋势。

井距越小, 见效越早。C8 井组井距在 80~100 m,

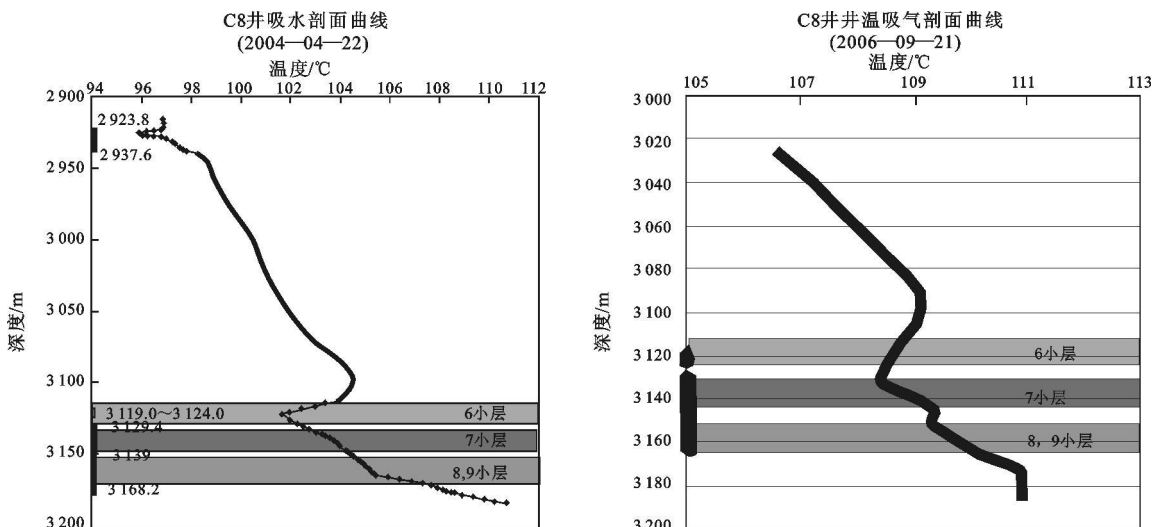


图 3 苏北盆地草舍油田泰州组油藏 C8 井吸水与吸气剖面对比

Fig. 3 Comparison between water and gas injection profiles of Well C8 in the Taizhou Formation reservoir in the Caoshe Oil Field in the Northern Jiangsu Basin

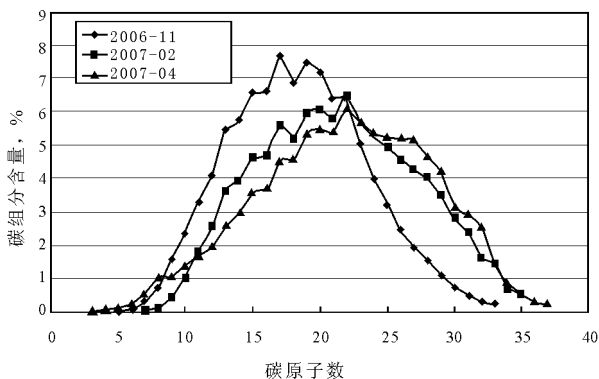


图4 苏北盆地草舍油田泰州组油藏 C11 井原油组分随时间变化曲线

Fig.4 Time-varying curve of crude oil component of Well C11 in the Taizhou Formation reservoir in the Caoshe Oil Field in the Northern Jiangsu Basin

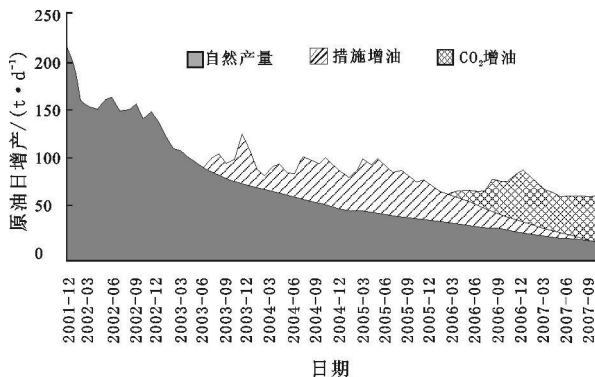


图5 苏北盆地草舍油田泰州组油藏 CO<sub>2</sub> 混相驱油增产效果

Fig.5 Stimulation result of CO<sub>2</sub> miscible flooding of the Taizhou Formation reservoir in the Caoshe Oil Field in the Northern Jiangsu Basin

注入0.007 HCPV后对应 C12, C15 井最先开始见效, 2 口井见效特征相似: 于 2006 年 2 月, 即 C8 井注入 7 个月 0.007 HCPV 时出现日产油上升、含水下降的趋势, 但每次不同程度的停注都会直接影响下一个月的产量。

小井距井先见气, 后见效。气组分监测显示: 2005 年 12 月, 即注气 6 个月后, C12 井第一个微量见气, 套管气中 CO<sub>2</sub> 气组分含量为 77.97%, 2006 年 2 月开始见效, 2006 年 8 月该井套管含气量 89.65%。其余生产井井距相对较大, CO<sub>2</sub> 气含量较低, 呈现先见效、后见气的特征, 如: C15 井在注气 7 个月时见效, 2006 年 4 月, 注气 10 个月后, 见 CO<sub>2</sub> 气, 含量较低, 至 2006 年底, 该井含气量 34.42%。C11 井注气 7 个月后果效, 但目前 CO<sub>2</sub> 气含量仍很低, 仅为 3.43%。

为比较注气后的开发效果, 将草舍油田泰州组油藏分为 2 块转注 CO<sub>2</sub>, 图 5 为第一批注气区块 C11, C12, C15, QK26 等 4 口井的增产效果图。参考加拿大 Weyburn 油田 CO<sub>2</sub> 驱油增产趋势和数模预测, 扣除自然产量和措施产量, 草舍油田泰州组油藏 CO<sub>2</sub> 驱油已处于见效的初始阶段, 基本抑制了油藏注水开发时产量持续递减的趋势。

## 5 结论

CO<sub>2</sub> 驱适应性分析认为, 苏北盆地溱潼凹陷草舍油田泰州组油藏适合开展 CO<sub>2</sub> 混相驱矿场试验。

油藏注气前后的监测对比表明, CO<sub>2</sub> 驱在一定程度上改善了水驱开发效果, CO<sub>2</sub> 驱后吸气剖面得到改善, 气驱波及体积扩大; 原油组分的主峰

碳数向高碳数移动, 表明油藏水驱时不能动用的重质组分已逐渐被动用。

初步形成了 CO<sub>2</sub> 驱油配套工艺技术, 草舍油田泰州组油藏 CO<sub>2</sub> 驱油先导实验已初见成效, 证明 CO<sub>2</sub> 驱油技术在陆相复杂小断块油田也是行之有效的。

### 参考文献:

- 李士伦, 张正卿, 冉新权等. 注气提高石油采收率技术[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2001. 1~ 25
- 李士伦, 周守信, 杜建芬等. 国内外注气提高采收率技术回顾与展望[J]. 油气地质与采收率, 2002, 9(2): 1~ 5
- 郝永卯, 陈月明, 于会利. CO<sub>2</sub> 驱最小混相压力的测定预测[J]. 油气地质与采收率, 2005, 12(6): 68~ 70, 91
- 李振泉, 李相远, 袁明琦等. 商 13—22 单元 CO<sub>2</sub> 驱室内实验研究[J]. 油气地质与采收率, 2000, 7(3): 17~ 19
- 刘伟, 游有光, 杨皋. 苏北溱潼箕状凹陷的形成演化机制及油气成藏特征[J]. 断块油气田, 1999, 6(6): 10~ 12, 22
- 施泽进, 张渝昌. 苏北溱潼凹陷形成演化的运动学模拟[J]. 石油实验地质, 1994, 16(4): 325~ 333
- 彭仕宓, 史彦尧, 韩涛等. 油田高含水期窜流通道定量描述[J]. 石油学报, 2007, 28(5): 79~ 84
- 侯健. 提高原油采收率潜力预测方法[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2007. 31~ 33
- 庞彦明. 国外油田注气开发实例[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000. 84~ 94
- 常子恒. 石油勘探开发技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001. 194~ 216
- Moritis G. CO<sub>2</sub> injection gains momentum [J]. Oil & Gas Journal, 2006, 104(15): 37~ 41
- 徐艳梅, 郭平, 张茂林. 温五区块注气效果影响因素研究[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(2): 31~ 33

(编辑 韩 或)