

交联黄原凝胶在实际油田剖面调整中的应用

M.R. Avery, et al.
Pfizer Inc.

梅佑黔 译
唐养吾 校

摘 要

世界上大多数油田受地层非均质的影响,使注水采油的扫油效率显著地降低。五年来,黄原胶/三价铬凝胶已成功地用于改善了北美一些油田的注入井流动剖面。这一方法包括选择性地将络合的生物聚合物注入水漏失层,形成凝胶强度后,使后来的注入水进入没有被扫及到的含油层。本文讨论了这一技术的一般理论,黄原胶/三价铬凝胶的特性和优点以及实际油田上应用的结果。

引 言

油田一次采油达到经济极限并开始注水时,采出程度常常低于预期的结果。油层的非均质和射孔孔眼分布排列不当,常常形成水漏失带,引起迅速水窜、高水油比以及地下原油采出程度低。近三十年来,在实验室和矿场都研究了上述问题。八十年代初,交联聚合物成为一种特别的处理方法。由于交联聚合物的成本低廉,因而,早期的大部分工作集中在聚丙烯酰胺的研究与应用上^{〔1-3〕}。这项工作包括连续注入含铝离子(如柠檬酸铝或硫酸铝)的稀溶液或者含三价铬离子(由控制六价铬的还原反应在地下形成)的稀溶液,在地下实现交联。对上述方法的一个改动是在地面将聚丙烯酰胺、六价铬离子和延迟反应还原剂混合,然后注入地层;另一个变动是使单体在地下聚合。聚丙烯酰胺处理的效果对剪切力的影响很敏感,同时受注入水和地层水以及岩性的限制。至目前为止聚丙烯酰胺的处理效果是不够稳定的。

1980年Mobil研究和发展有限公司恢复了六十年代在矿场试验过的技术,并用黄原胶/三价铬凝胶处理了几个油田^{〔4〕},结果特别好。Mobil在北美继续使用这种技术,并计划扩大到欧洲。

Pfizer公司实际上为Mobil的方案提供了全部需用的黄原胶(Flocon 4800p),因而必然重视提供完整系列的化学产品、工程分析和工程设计以及油田应用。在过去三年内,pfizer公司的油田生产组已处理了50多个油田,结合Mobil公司早先用黄原胶/三价铬凝胶处理过的600多口井的实践,石油公司(雇主)认为75—80%的工程项目是成功的。成功的原因可归因于黄原胶/三价铬凝胶的独特性质以及由Mobil和Pfizer公司发展的应用技术。

技 术 特 点

黄原凝胶 (Xanthan Gels) 是由三价铬与黄原胶分子的羧基离子结合而形成的(图1)。这种弱结合方式形成的凝胶在受到剪切时可变稀, 但保持着它的假塑性。当剪切力消除时, 又能恢复到原来的交联强度 (图2)。这一特点使得能在地面预制凝胶, 而且预制的凝胶仍然容易进入地层 (图3)。

与其它广泛应用的调整剖面的方法作一比较, 就可对黄原胶/三价铬凝胶的特点得到全面的了解。

1. 一步混合

由于黄原胶/三价铬凝胶是假塑性的, 因而能泵入地层, 其成分可在地面事先配好, 而可泵性可一直保持到注完为止。铬和聚合物在与地层接触前进行相互反应, 可减少交联剂的吸附损失, 从而保证了所希望的井下凝胶组成。事先配制还能在注入前检查凝胶的质量。其它凝胶体系需要延迟反应或有顺序地注入各种组分, 以防止过早地出现胶凝作用。地层和盐水特性影响延迟反应, 而按顺序注入又取决于地下良好的混合, 这一点很难掌握。因而无法保证各种成分进入同一个层内。

如果后勤工作或某些其它因素限制在地面上存储凝胶, 那么在关井期间黄原胶/三价铬凝胶在地层内能直接达到所要求的强度。

2. 无注入风险

如上所述, 黄原胶/三价铬凝胶的假塑性使得它在完全胶凝后仍能注入地层。这意味着即使注入系统偶然出现故障, 也不用担心会堵塞管道和井筒。其它大多数凝胶体系, 如果事先胶凝, 则不能有效地注入, 而且不用化学剂或机械清理方法则很难从管道中清除凝胶。在一次矿场施工中, 黄原胶/三价铬凝胶在管道和井筒中停留 30 小时以上, 泵重新工作后, 很快清除了凝胶。

3. 剪切稳定

注入黄原胶/三价铬凝胶时, 常常在短时间内受到极高剪切力的剪切, 但不降解。实验室研究已表明: 黄原胶/三价铬凝胶甚至经过高达两百万倒数秒 (秒分之一) 的剪切速率剪切后, 仍能恢复到原来要求的粘度。这意味着这些凝胶能按要求的那样迅速注入地层。

许多合成的聚合物对剪切极为敏感, 而且很容易降解。这样就限制了凝胶在处理期间以及超过设计时间后的注入速度。如果聚合物降解, 凝胶性质自然要受到影响。

4. 选择性注入

研制一种性能良好的凝胶是一回事, 而把凝胶注入到需要的层段又是另一回事。实验室研究和现场观察表明, 预先制成假塑性的凝胶比牛顿流体对高渗透层更有选择性。涉及到本文中提到的理论解释和这一说明后面的数据, 不久将作为单独文章发表。

其它在地面混合的凝胶体系或在地下发展凝胶性质的其它凝胶体系, 都没说明具有选择性。而且凝胶可能进入不需要处理的层中, 并能减少该层中的流量。在按顺序注入的体系中, 如果各种成分的溶液有着不同的粘滞特性, 那么要做到选择性进入要处理的层段将成为一个较大的问题。

黄原胶/三价铬凝胶的选择性实例示于图4中。

5. 穿透深

为了减少横向流动影响,在经济上可行的情况下,尽可能将凝胶注入地层深部。黄原胶/三价铬凝胶只要能泵送,它就能保持液态。因此,能深入注到油层内数百英尺。其它一些凝胶体系的各种成分容易在井底附近大量滞留,因而限制了进入深度。而在地下聚合情况下,反应速度的条件限制也影响了凝胶进入地层的深度。在 Mobil 的一篇文章中报道了横向流动影响的重要性^[9]。

6. 可逆性

当进行三次处理采出残余油时,有时可能需要再处理凝胶事先处理过的层段。所有的聚合物很容易被各种试剂破坏。当凝胶受到破坏后,扫过油层的是凝胶的各个组分。由于黄原胶(35—150磅/英亩-英尺)的滞留量特别低,这意味着不会永久地改变地层渗透性(图5)。而合成的聚合物滞留量高(150—400磅/英亩-英尺)并能形成比黄原胶高2—5倍的残余阻力系数。因此严重的限制了这些层中的流量。

7. 安全性

用美国安全指南检测过黄原胶,并断定它是无毒的。六价的铬是有毒的,并且是一种受管制的污染物。尽管三价铬也是一个受管制的物质,但对环境污染的危害较小^[10]。

矿 场 经 验

五年多的矿场应用已提供了一个大范围的作业参数(表1)。目前,已知的唯一限制条件是温度。在71℃(160°F)以上黄原胶/三价铬凝胶开始不稳定。正在研究用于71℃以上温度的其它凝胶体系^[11]。

下面讨论了几个实际油田的实施情况。

表 1 使 用 范 围

盐水

- 含盐量(矿化度) ——23%+
- 硬度 ——2%+
- 硫化氢 ——4000ppm
- pH值 ——5—8
- 铁 ——100ppm

油藏

- 砂岩和灰岩
- 裸眼井和下套管的井
- 平均渗透率最低1.0毫达西
- 温度到160°F(71℃)

1. 油田I

1983年5月一家主要的美国石油公司在位于北路易斯安那州的一个油田内处理了四口井。产油深度范围为1100—1500英尺,共有两个砂岩油层组。表2中列出了油田的各项参数。处理前的流动剖面表明,100%的注入水进入IIB砂层组。然而,注入水却向上转移,进

入没有射孔的IIA砂层组。这就使处理变得复杂化了，因为凝胶必须从下部砂层转移到IIA砂层中，而又不能让凝胶留在下面，以致限制处理后水流进较低的砂层。

表 2 油田 I —— 油田参数

岩性	Nacatoch 砂岩
深度	1100至1500英尺
温度	90°F(32℃)
有效厚度	100英尺(30米)
水平渗透率	50至1200毫达西
	平均141毫达西
垂向渗透率	平均124毫达西
孔隙度	平均32%
有代表性的注入量	在100磅/英寸 ² 时,为2300桶/天
油比重	37.1°API
盐水矿化度	23000ppm
完井方式	套管
井距	40英亩

4口井总计注入14900桶黄原胶/三价铬凝胶。预计只在一个射开的砂层段剖面有一些变化。处理后的剖面测井大约是在两个星期后进行的，但未能测出变化。然而，以后的生产监测表明，在18个月内增产了10800桶油（按罐存油计）（图6）。

由于监测不完善，上述结果不能立刻看到，因而决定射开IIA砂层并进行重复处理。而这一决定是在1984年11月才做出的。这段时间的流动剖面测井，测出了良好的结果（图7和图8）。计算每口井的霍尔（Hall）曲线也证实了吸水能力的变化（图9）。尽管得到的可靠生产数据不多，但整个1985年的增产油量一直保持在同一水平。

1985年9月进行了一次彻底的剖面测井，这次测试表明了处理后的流动情况保持不变。推广到全油田的计划将在1985年末完成。

2. 油田 I

这个宾夕法尼亚纪的砂岩油田位于得克萨斯州的Wichita Fall附近。尽管六十年代初开始注水，但吸水剖面表明，大约在25层中仅有2或3层吸水。自注水初期以来，含水高于80%。油田参数示于表3。

1983年11月用42000磅铬络合的黄原胶处理了对租借区生产动态有影响的4口注水井。在其中三口井中进行了放射性吸水剖面测量，结果表明流量基本上转向（图10）。第四口井因井径太小而无法下测井工具。

除了吸水剖面变化以外，在1984年2月生产上也有反应，水油比下降50—70%，低于基线值，而租借区的产油量是先前注水产量的两倍（图11和图12）。计划在1986年初将这一处理规划扩大到全油田。

3. 油田 II

东得克萨斯油田中的Woodbine砂岩中有高渗透夹层，地层渗透率在300—3000毫达西之间变化。六个主要石油公司在这个油田内采油。其中有一家公司最近用黄原胶/三价铬凝胶处理了13口注水井，因为剖面测井表明大多数井仅顶部层位吸收了全部的注入水。油田的详

表 3 油田Ⅰ——油田参数

岩性	宾夕法尼亚砂岩
深度	300—2000英尺 (92—615米)
温度	90°F(32℃)
有效厚度	35英尺(11米)
渗透率	1至900毫达西 平均175毫达西
孔隙度	平均20%
原油比重	40°API
盐水矿化度	70000ppm
完井方式	套管
井距	4.5英亩

细情况见表4。1985年3月开始调整剖面,在两个月期间总计注入50500磅交联的黄原胶。

表 4 油田Ⅱ——油田参数

岩性	Woodbine 砂岩
深度	3700英尺(1138.4米)
有效厚度	35英尺(11米)
渗透率	300至3000毫达西
孔隙度	平均25%
盐水矿化度	30000 ppm
有代表性的注入量	在30英寸真空度时,为600桶/天
完井方式	套管
井距	5英亩

处理后的流动剖面测井表明:13口井中的12口井吸水剖面有了变化。有代表性的结果示于图13中。虽然写本文时要全面评价这一成果尚为时过早,但1985年整个9月份的产量平均每日比处理前日产1170桶油的数值多200桶(图14)。石油公司预计最终将增产319,000桶油。

4. 油田Ⅳ

假塑性凝胶的优点之一是不堵塞井筒或管道系统,利用该系统能同时处理很多井。该油田位于南俄克拉何马州。利用凝胶的选择性大大减少了全部的处理时间。考虑过各种各样的处理方法,而使用其它凝胶体系都要冒风险。

1984年8月,用16500磅黄原胶/三价格凝胶处理了油田内12口线性驱注水井中的9口井。表5给出了油田参数。7口井在专一的管汇上同时进行处理。另外两口井作个别处理。处理技术包括使通过管汇流至每口井的流量达到平衡,以便在大约相同的时间完成各口井设计的处理量。每一口井注入所需的凝胶段塞量时,其余的井分别关闭,直到管汇上的所有井处理完为止。当所有的井处理完毕时,冲洗整个管汇以清除管道系统和井筒中的凝胶。黄原

胶/三价铬凝胶受到剪切影响时变得很稀，甚至在管道中停留两天以上仍容易泵入地层。

表 5 油田Ⅳ——油田参数

岩性	宾夕法尼亚砂岩
深度	2675—3452英尺 (823—1062米)
温度	108 °F(42 °C)
有效厚度	平均43英尺(13米)
渗透率	平均50毫达西
孔隙度	平均20%
有代表性的注入量	在380磅/英寸 ² 时, 平均165桶/天
油比重	28 °API
盐水矿化度	120200 ppm
完井方式	套管(长条形孔眼)
井距	10英亩

处理后的流动剖面指出, 75%的井显示液体转向。图15表示了两口井的结果。目前每日平均净增油量为50桶, 石油公司(雇主)预计总增产油量为70000桶。

5. 碳酸盐岩地层

尽管上述四个矿场实例均为砂岩地层, 但黄原胶/三价铬凝胶在碳酸盐地层效果也是一样的。Pfizer 公司在美国和加拿大已处理了12个不同的油田。这些油田大约一半是灰岩, 一半是白云岩地层。

在过去一年内, 已完成了大部分调整剖面的计划。因时间关系, 对生产动态的了解是有限的。然而, 至少有75%的处理井吸水剖面有变化。

结 论

1. 黄原胶/三价铬凝胶在600多口井处理中已证明是一个有效的流动剖面调整剂。
2. 黄原胶/三价铬凝胶的特性能保证它比其它凝胶体系的风险性小。
3. 实际矿场试验结果已证明黄原胶/三价铬凝胶处理能增产更多的油。

参 考 文 献

1. Breston, J. N., "Selective Plugging of Waterflood Input Wells, Theory, Methods, and Results," J. Pet. Tech., 26-31, March, 1957.
2. Hoyer, W. F., J. Ramos, "Selective Plugging in Injection Wells by In Situ Reactions," J. Pet. Tech., 17-20, January, 1957.
3. Sloat, B. F., J. P. Fitch, and J. T. Taylor, "How to Produce More Oil and More Profit with Polymer Treatments," SPE 4185, 43rd Ann. Calif. Regional Meeting, Bakersfield, November 8-10, 1972.
4. Needham, R. B., C. B. Threlkeld, and J. W. Gall, "Control of Water Mobility Using Polymers and Multivalent Cations," SPE 4747, 3rd SPE Symposium on Improved Oil Recovery, April 22-24, 1974, Tulsa.
5. Sparlin, D., "An Evaluation of Polyacrylamides for Reducing Water Production," J. Pet. Tech., 906-914, August, 1976.
6. Sandiford, B. B., G. A. Graham, "Injection of Polymer Solutions in Producing Wells," AIChE Symposium Series, 69(127), 38, 1973.
7. Sloat, B. F., "Oil Production Response from Polymer Treatment Under Varying Conditions," AIChE Symposium on Polymers in Oil Recovery, February 20-23, 1972, Dallas.
8. Hessert, J. E., P. D. Flemming III, "Gelled Polymer Technology for Control of Water in Injection and Production Wells," 3rd Conference on Tertiary Oil Recovery, U. of Kansas, Lawrence, 1979.
9. Abdo, M. K., H. S. Chung, C. H. Phelps, and T. M. Klaric, "Field Experience with Floodwater Diversion by Complexed Biopolymers," SPE/DOE 12642 4th Symposium on Enhanced Oil Recovery, April 15-18, 1984, Tulsa.
10. Garner, H. R., "Meeting the Regs: How Trivalent Helps," Products Finishing, September, 1983, pp. 48-52.
11. Chang, P. W., I. M. Goldman, K. J. Stingley, "Laboratory Studies and Field Evaluation of a New Gelant for High-Temperature Profile Modification," 60th ANNUAL SPE MEETING, September 22-25, 1985, Las Vegas.

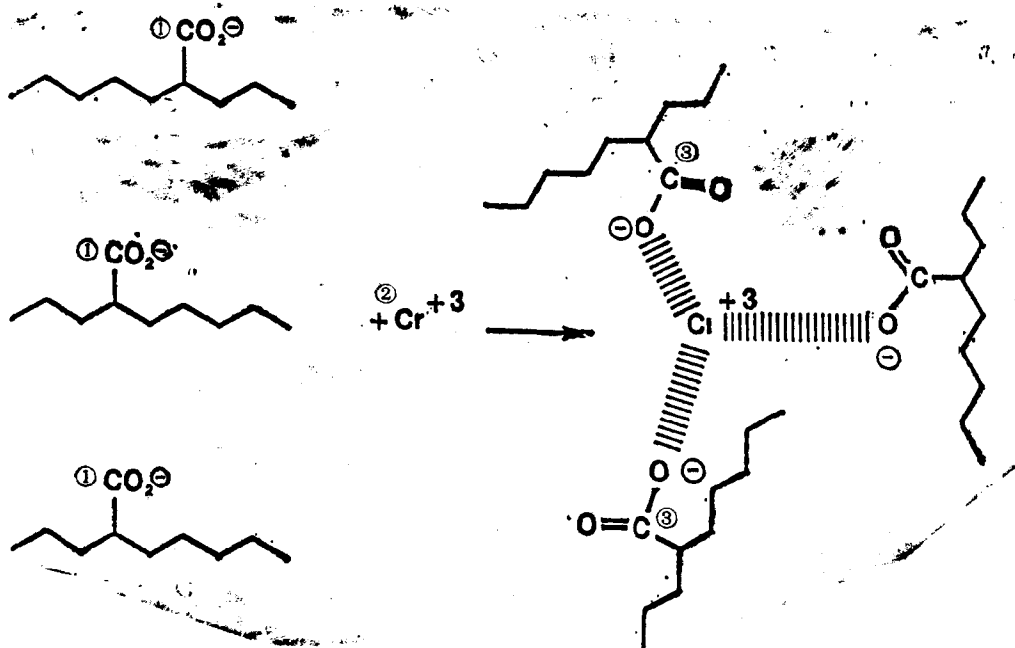


图 1 黄原胶/三价铬凝胶的离子结合示意图

①羧基；②三价铬离子；③羧基

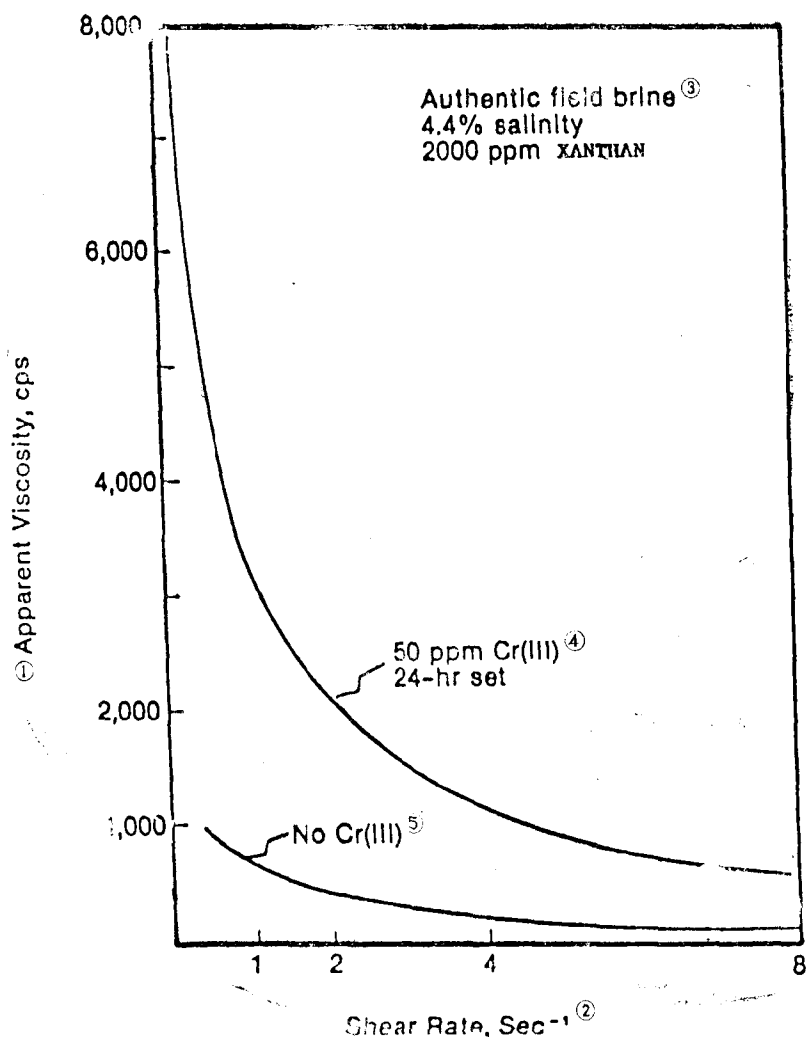


图 2 黄原胶/三价铬凝胶的剪切变稀关系曲线

①表观粘度，厘泊；②剪切率，秒⁻¹；③4.4%盐度的Authentic油田盐水配制的含2000ppm的黄原胶溶液；
④含50ppm三价铬离子，放置24小时；⑤不含三价铬离子

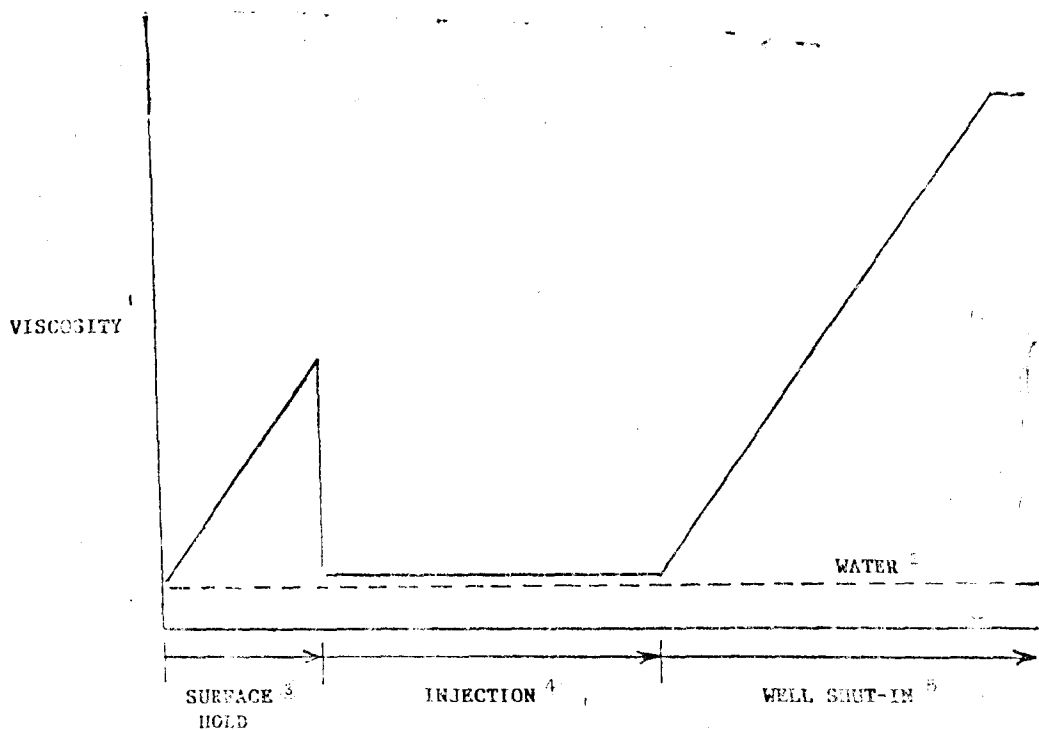
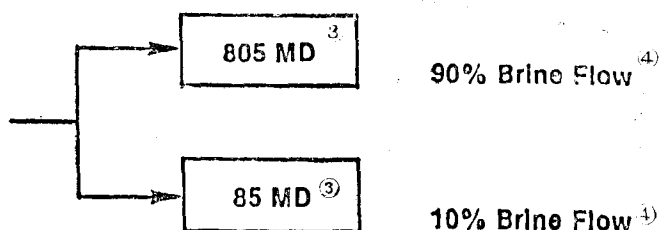


图 3 凝胶注入能力变化过程

①粘度；②水；③地面保持的粘度；④注入时的粘度；⑤关井后的粘度

BEFORE TREATMENT



AFTER TREATMENT^②

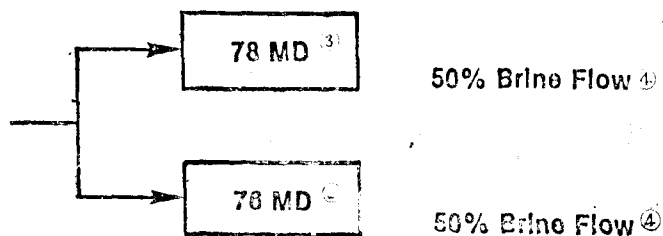


图 4 凝胶的选择性

①处理前；②处理后；③毫达西；④%盐水流量

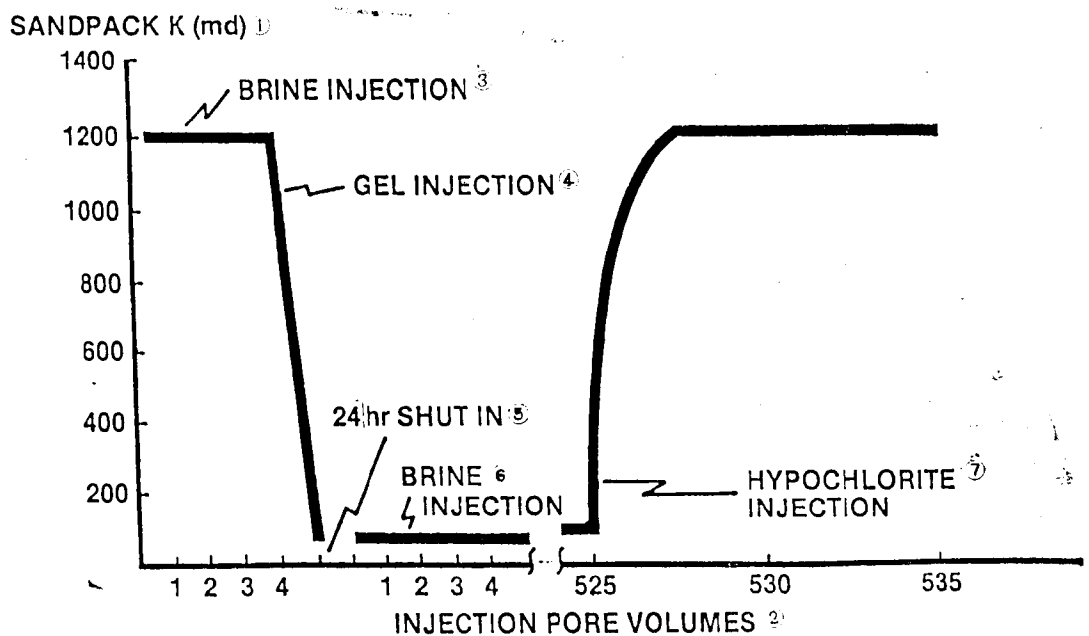


图 5 凝胶的耐用性和可逆性

①填砂模型，毫达西；②注入孔隙体积；③注入盐水；④注入凝胶；⑤关闭24小时；⑥注入盐水；
⑦注入次氯酸盐

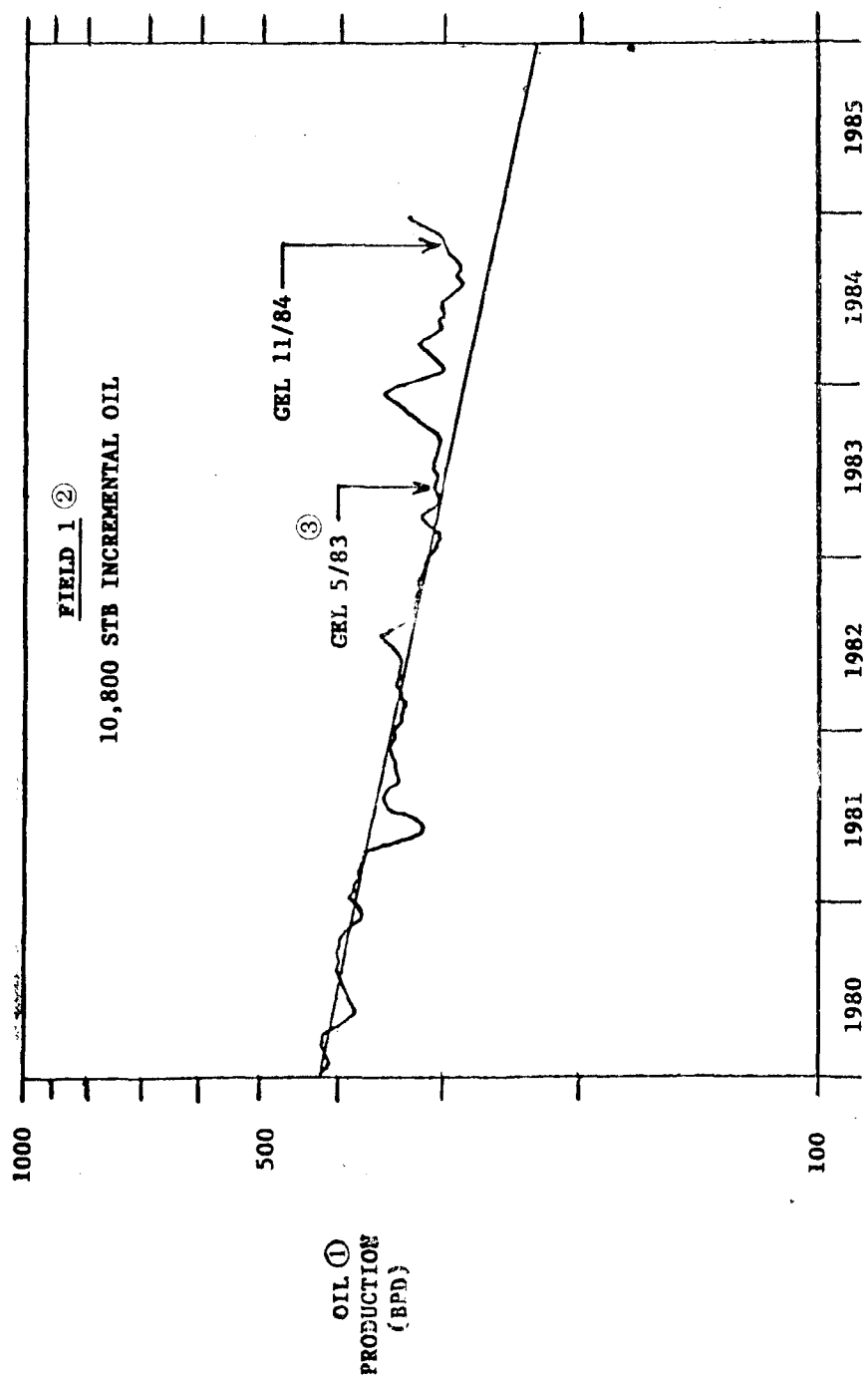


图 6 油田 I——凝胶处理动态

①产油量, 桶/天; ②油田 I, 增产 10800 桶油(按罐存油计); ③ 83 年 5 月凝胶处理

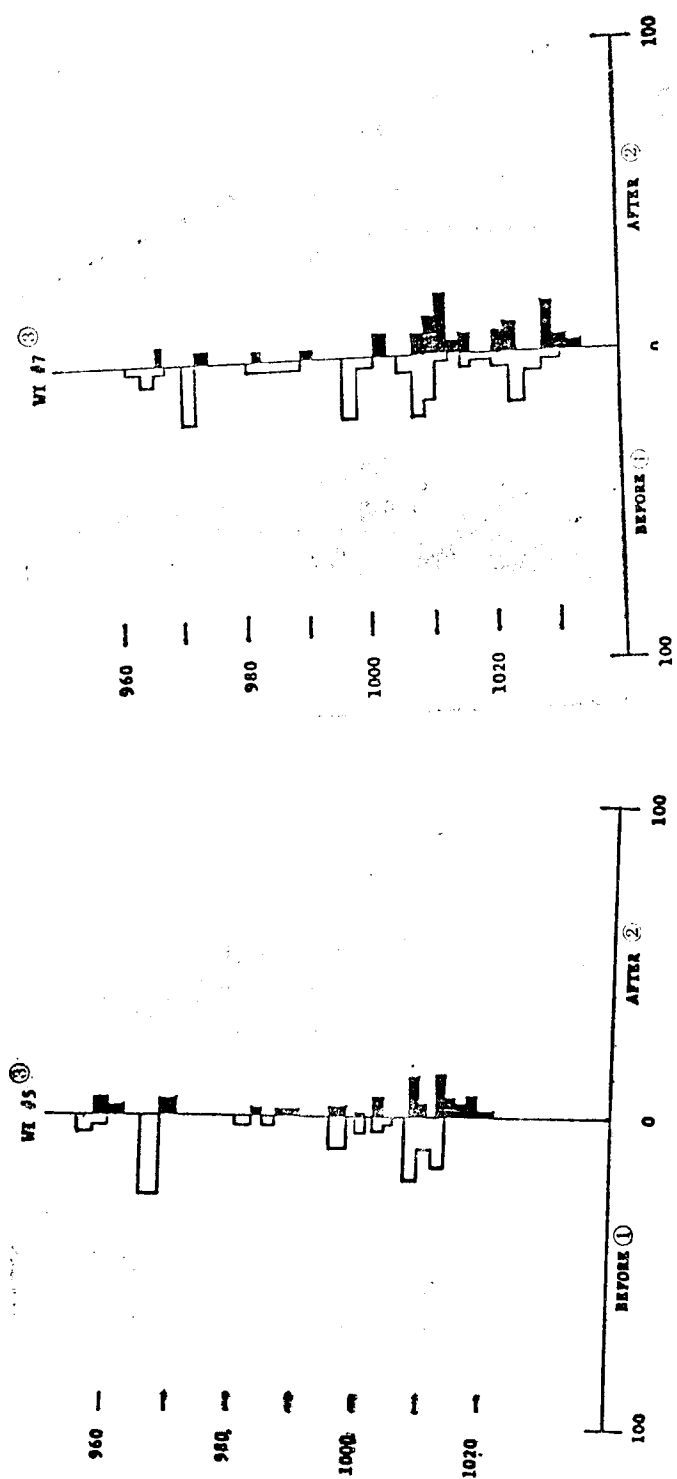


图 7 油田I——5号和7号井吸水剖面
①处理前; ②处理后; ③ 5号井, 7号井

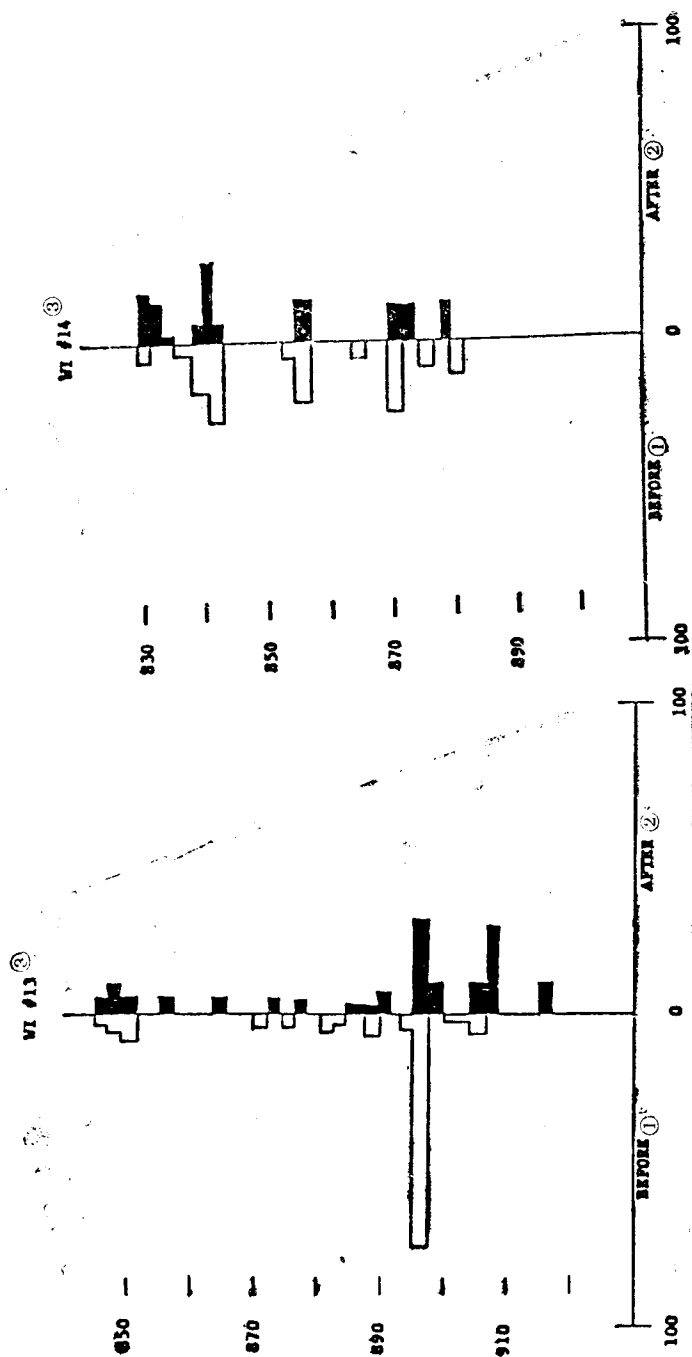


图 8 油田 I—13 号和 14 号井吸水剖面

① 处理前; ② 处理后; ③ 13 号井, 14 号井

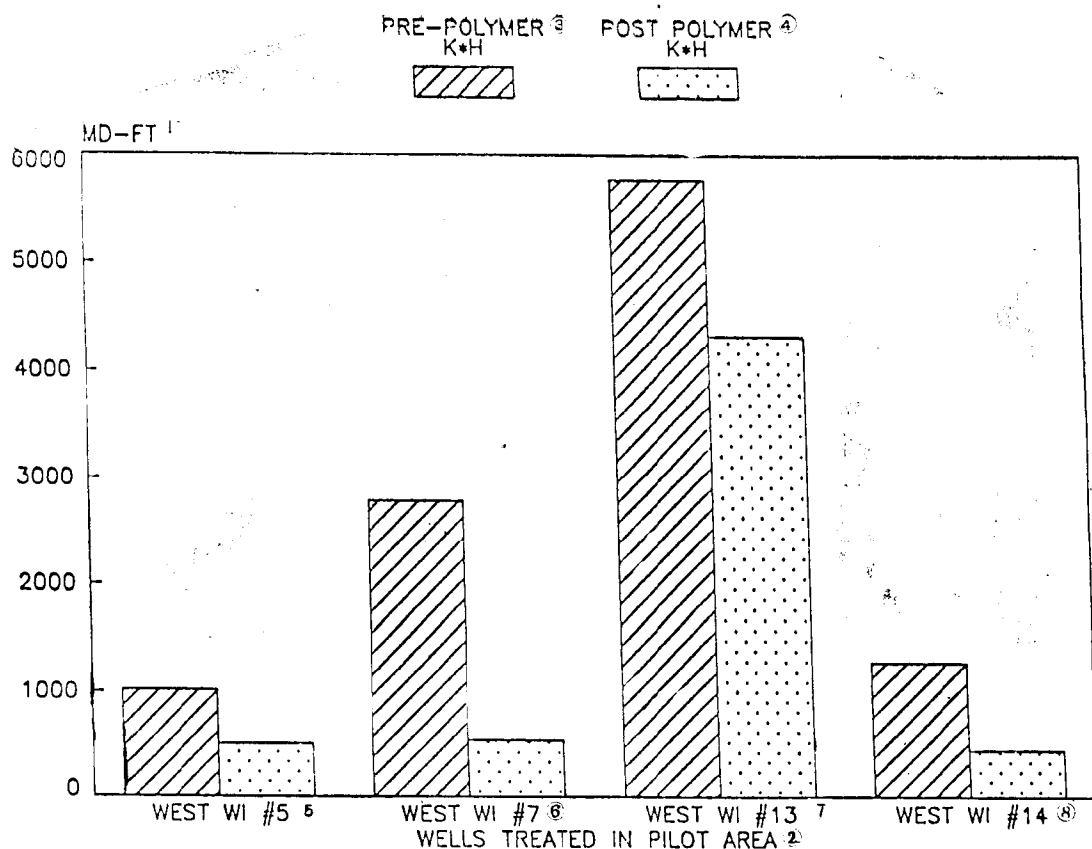


图 9 油田I——霍尔 (Hall) 曲线计算结果的汇总
① 毫达西-英尺; ② 先导性试验区中的处理井; ③ 注聚合物前; ④ 注聚合物后;
⑤、⑥、⑦、⑧均为井号

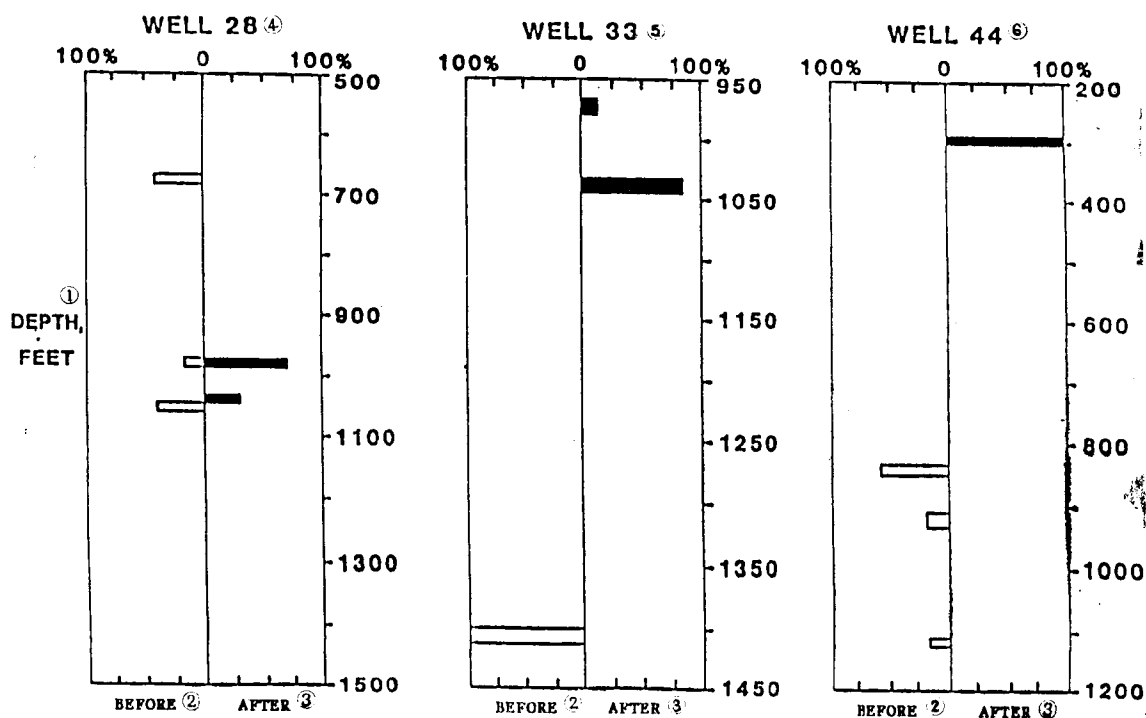


图 10 油田II——吸水剖面
① 深度, 英尺; ② 处理前; ③ 处理后; ④、⑤、⑥均为井号

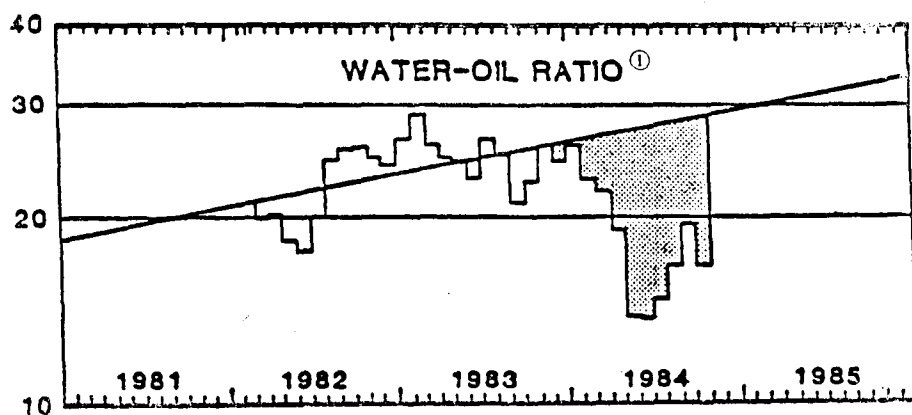


图 11 油田Ⅱ——对比井的水油比
①水油比

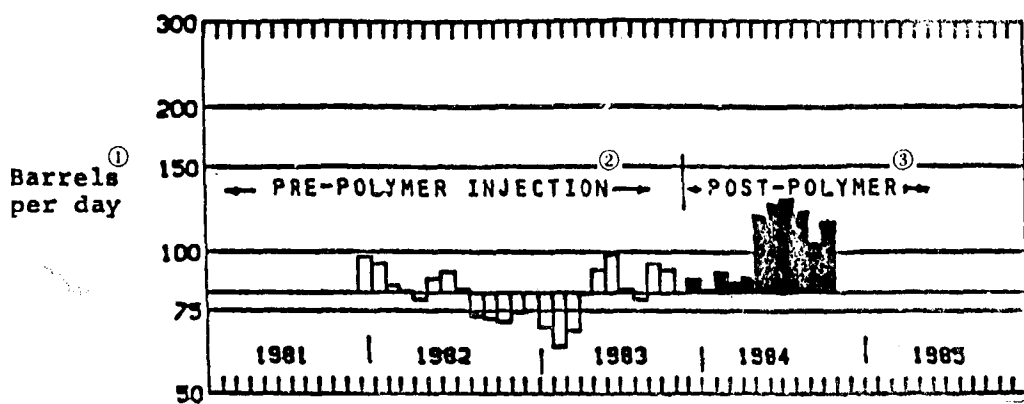


图 12 油田Ⅱ——对比井的产油量变化
①每天桶数；②聚合物注入前；③聚合物注入后

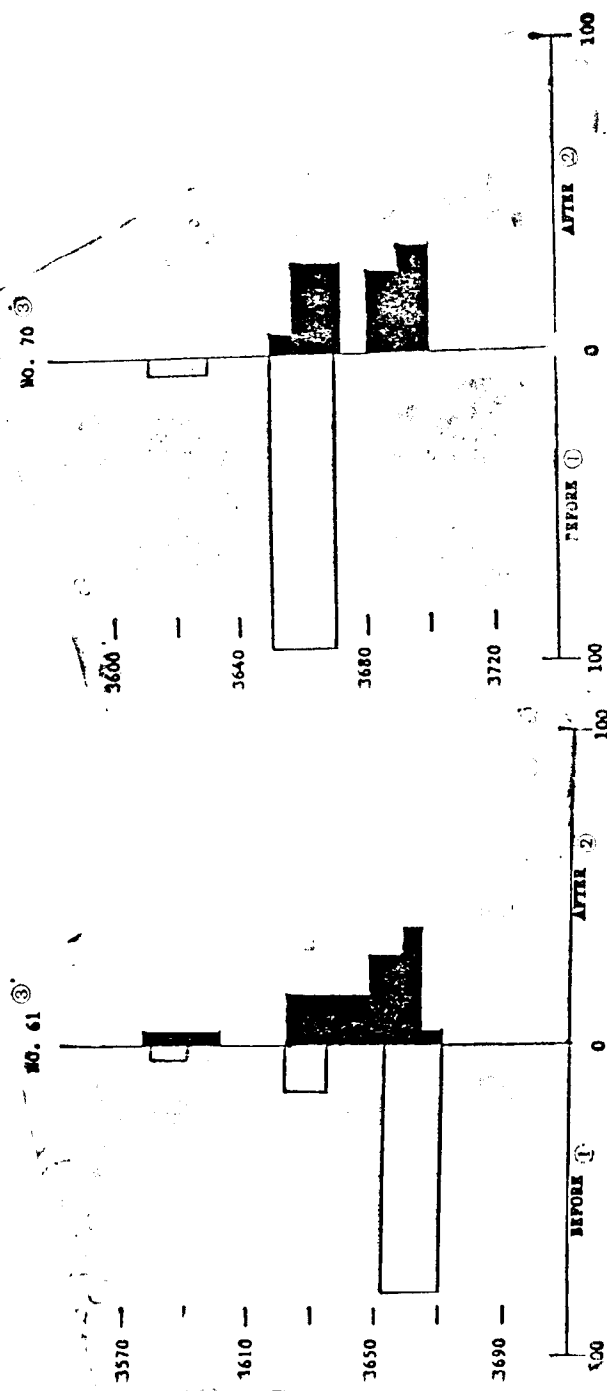


图 13 油田Ⅲ——有代表性的吸水剖面

①处理前; ②处理后; ③、④井号

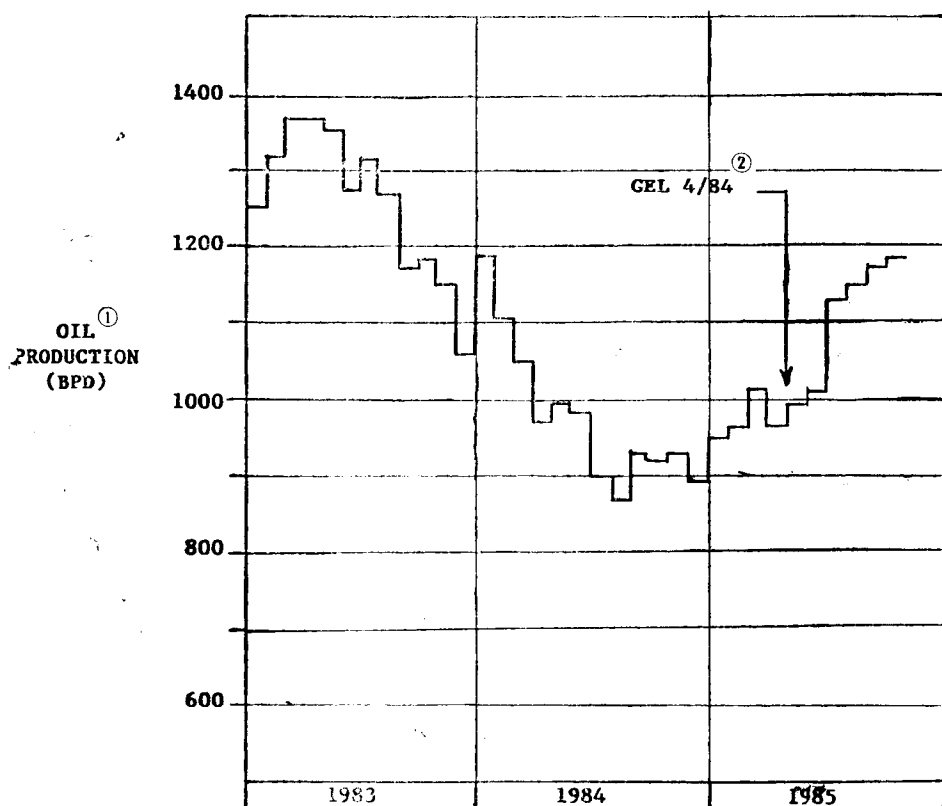


图 14 油田Ⅲ——产油量曲线

●产油量，桶/天；②1984年4月凝胶处理