



# 大庆油田二氧化碳驱油技术 研究与实践

二〇一六年三月



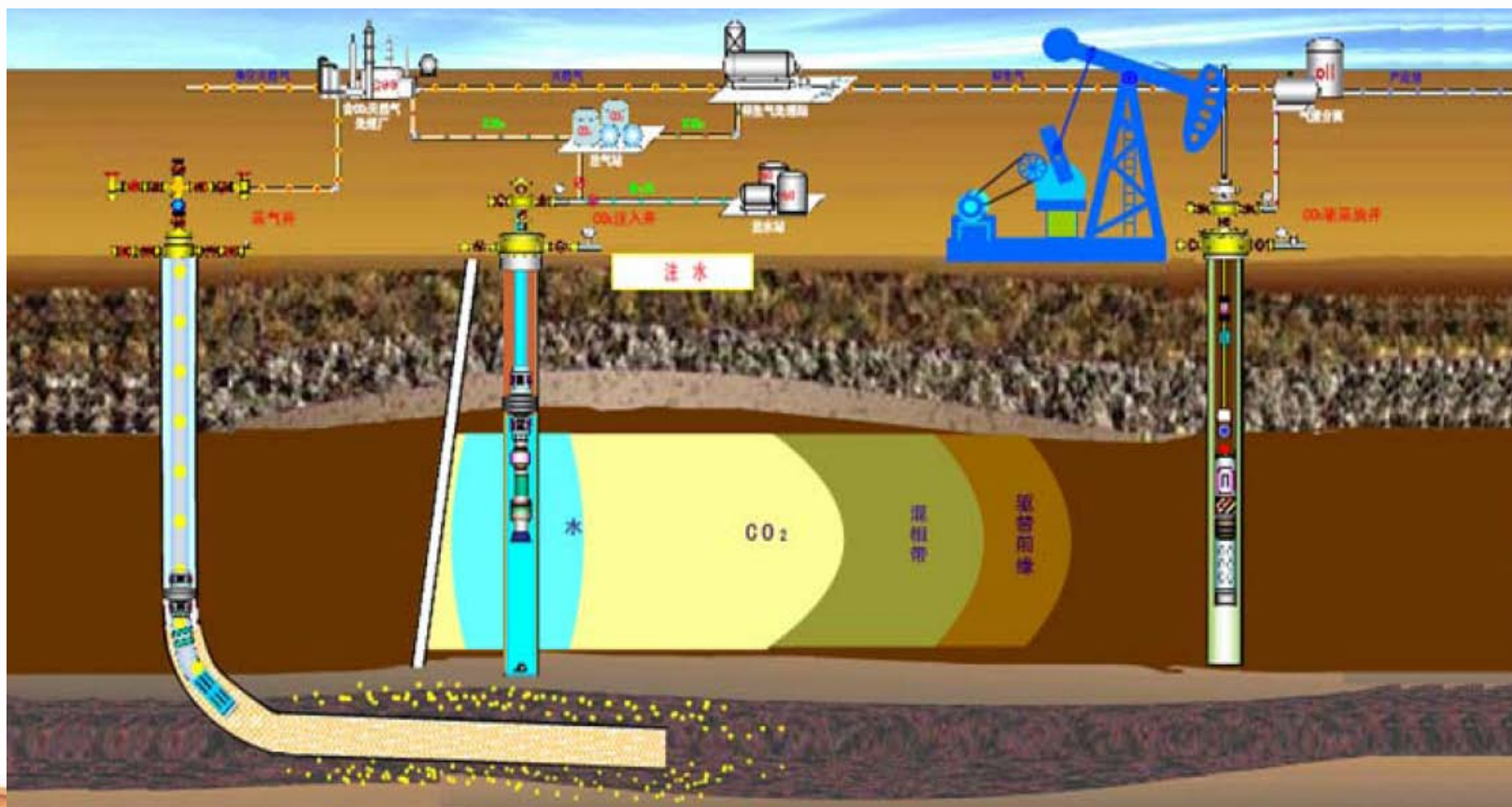


大庆油田主体位于黑龙江省西部，其中长垣主力油田油层厚度大、物性好，采用水驱、化学驱开发；长垣外围油田油层厚度薄、物性差，采用水驱开发。此外，还包括内蒙古自治区的海拉尔油田及外蒙的塔木察格油田



以油田自产天然气中副产CO<sub>2</sub>为气源，建立碳捕集、注入和回收回注全流程密闭，实现“驱油”经济效益与“减排”社会效益双赢

## 天然气藏开发及CO<sub>2</sub>-EOR与埋存示意图





## 自2003年以来，针对特低渗油藏的三种对象开展了4个CO<sub>2</sub>驱油现场试验，探索该类油藏有效开发的新途径

- ◆ 水驱难以动用的油层，注气建立有效驱动体系
- ◆ 水驱动用效果差的油层，注气改善开发效果
- ◆ 水敏性强的油层，改变驱替方式

大庆油田注CO<sub>2</sub>试验情况表

区块名称	树101	芳48	树16	贝14
注气时间(年)	2007	2003	2011	2011
渗透率(mD)	1.06	1.26	0.8	1.2
注采井数(口)	35/87	15/30	33/50	29/101
原始地层压力(MPa)	22	20.2	22.6	17.6
混相压力(MPa)	32.2	41.2	31.9	16.6
水敏程度	中水敏	中水敏	中水敏	强水敏
混相特征	近混相	非混相	近混相	混相
水驱动用状况	水驱难以动用	水驱难以动用	水驱效果差	注水困难
注气目的	建立驱动体系	建立驱动体系	改善开发效果	改变驱替方式



# 汇报提纲

一、二氧化碳驱研究背景

二、二氧化碳驱矿场试验效果

三、主要技术成果

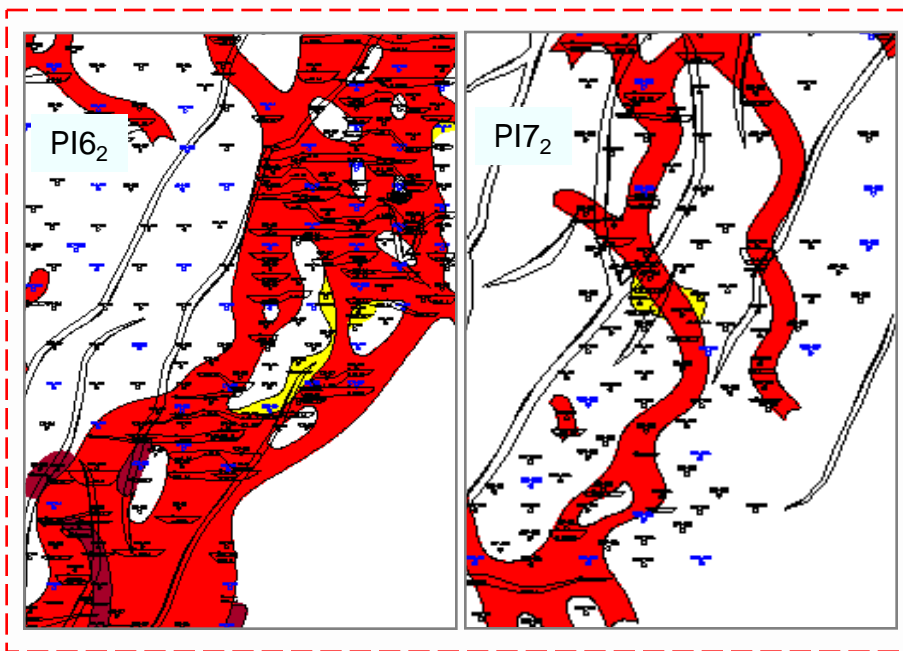
四、存在的主要问题及下步攻关思路

## (一) 长垣外围扶杨油层发育差，水驱难以有效动用

以河流相沉积为主，砂体以条带、断续窄条带为主

扶杨油层主要为复合型油藏，埋藏深度为中浅层。砂体宽度在300-600m

典型区块沉积微相

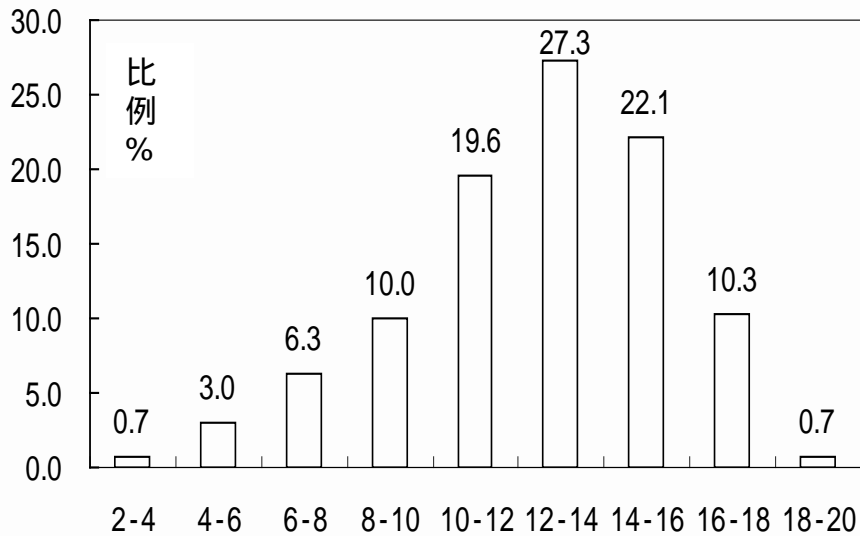


扶杨油层基础参数表

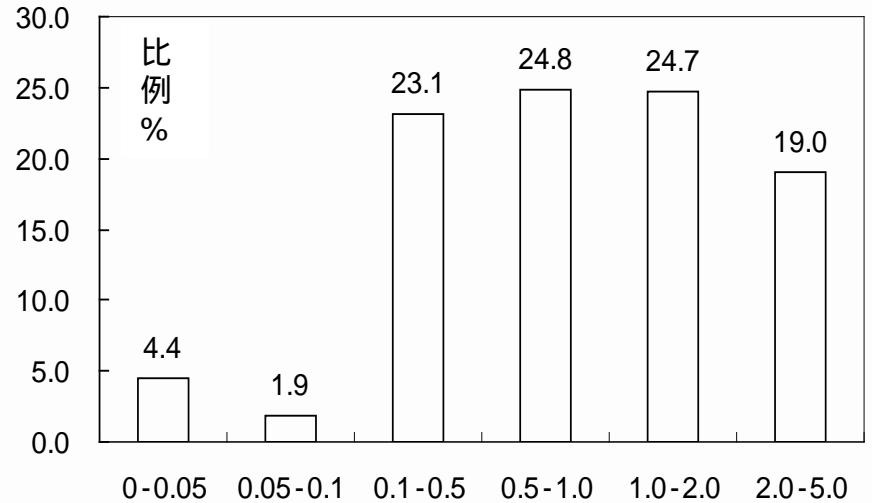
油藏埋深	1800-2300m
地层原油密度	0.78-0.82g/cm <sup>3</sup>
地层原油粘度	3-9mPa·s
原始气油比	20m <sup>3</sup> /t
饱和压力	5MPa
压力系数	1.1MPa/100m
原始地层压力	20-22MPa
地温梯度	4.7 /100m
原始地层温度	85-110

## 渗透率低，流度低，属特低渗透储层

平均空气渗透率1mD左右，地层原油粘度6mPa·s，原油流度仅0.17mD/mPa·s



扶余油层岩心孔隙度分布频率图



扶余油层岩心渗透率分布频率图

# 水驱开发效果较差

水驱压裂投产初期单井日产油 < 1.5t，目前 < 0.7t，采油速度低于0.46%

长垣外围油田部分已开发扶杨油层动用状况分析表

区块	有效厚度 (m)	空气渗透率 ( $10^{-3} \mu m^2$ )	地层原油粘度 (mPa·s)	原油流量 ( $10^{-3} \mu m^2 / mPa \cdot s$ )	日产油(t/d)		目前采油速度 (%)	动用状况
					初期	2014年12月		
源35-1北	9.6	1.0	8.0	0.13	0.83	0.2	0.04	难以动用
源35-1南	8.8	1.0	8.0	0.13	1.15	0.23	0.11	
源151	8.9	0.95	8.0	0.12	0.67	0.25	0.23	
源121-3	12.6	1.4	8.0	0.18	1.16	0.45	0.46	
茂401	16.5	0.4	4.2	0.10	0.4	0.11	0.33	
树2	16.5	1.06	4.1	0.24	1.3	0.56	0.22	
树8	16.8	1.06	4.1	0.24	1.5	0.7	0.30	
州2	8.7	0.9	6.0	0.15	0.6	0.1	0.14	



## (二) 海拉尔油田兴安岭油层水敏性强，水驱开发效果差

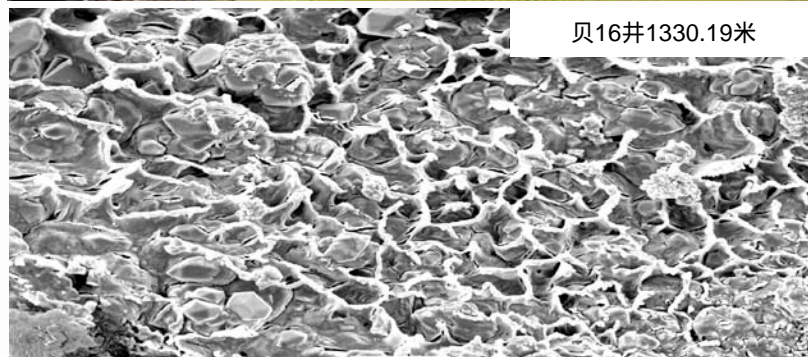
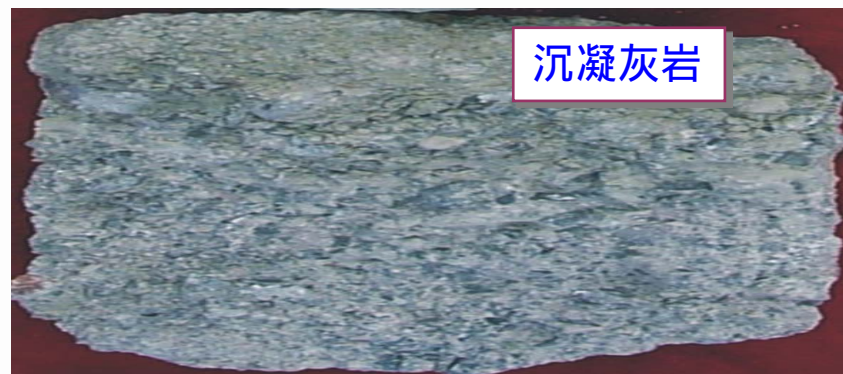
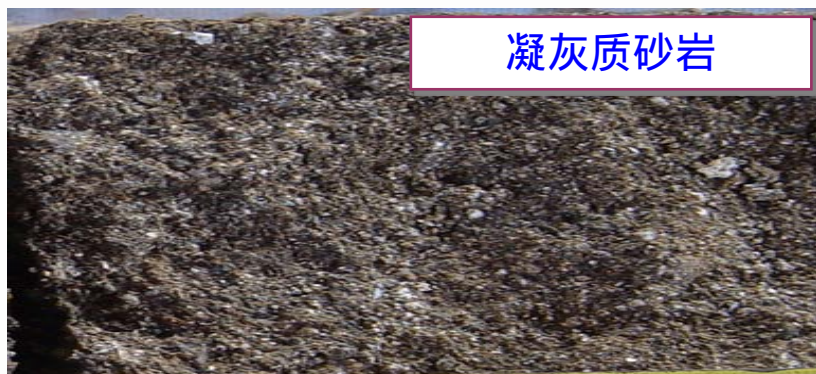
划分为四个油组，其中油层主要发育在 、 油组，共有  
26个小层

兴安岭油层基础参数表

油藏埋深	1600-1850m
地层原油密度	0.77g/cm <sup>3</sup>
地层原油粘度	4.7mPa·s
原始气油比	19m <sup>3</sup> /t
饱和压力	3.5MPa
压力系数	0.96MPa/100m
原始地层压力	15-17.8MPa
地温梯度	4.2 /100m
原始地层温度	67-77

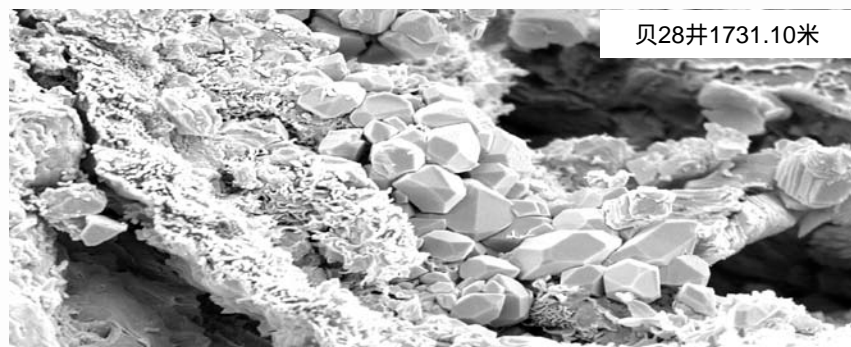


根据岩心观察，贝14区块兴安岭油层主要以凝灰质砂岩、凝灰质粉砂岩、沉凝灰岩为主，砾岩较少。储层中凝灰质含量高（27%），水敏性强，水敏指数0.82



贝16井1330.19米

柯绿泥石:三八面体绿泥石和蒙皂石1:1规则间层矿物



贝28井1731.10米

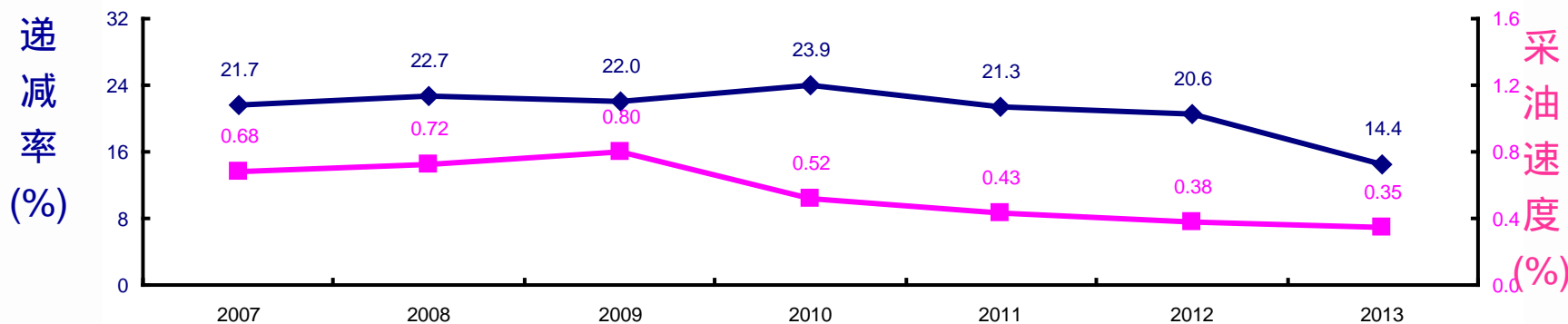
钠板石：二八面体蒙脱石、二八面体伊利石1:1规则间层



强水敏的海拉尔油田注水状况差，采油速度低、递减率高，2013年底（加密前）单井日产油1.5t

海拉尔油田注水状况统计表

类别	注水井数 (口)	有效厚度 (m)	配注 (m <sup>3</sup> )	实注 (m <sup>3</sup> )	占总井数比例 (%)
吸水较好	136	23.4	46	40	34.6
完不成配注	81	16.8	24	11	20.6
基本不吸水	176	11.1	16	2	44.8
合计	393	16.5	28	17	100



海拉尔油田递减率及采油速度曲线



# 汇报提纲

一、二氧化碳驱研究背景

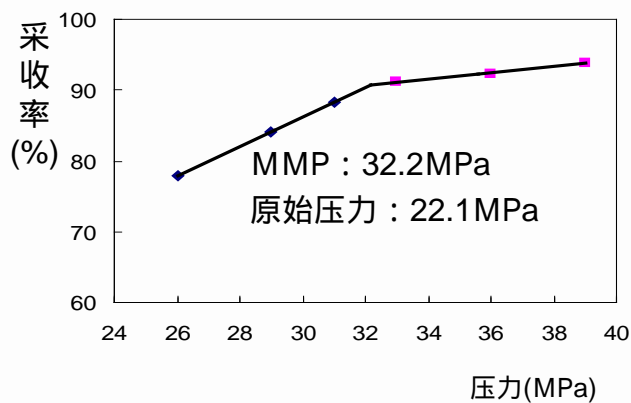
二、二氧化碳驱矿场试验效果

三、主要技术成果

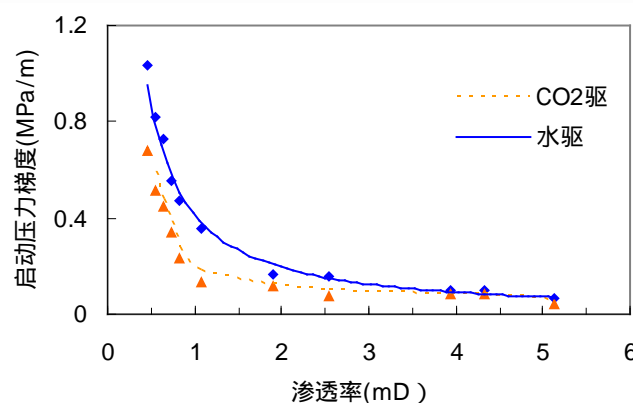
四、存在的主要问题及下步攻关思路

# (一) 非混相驱的树101试验区见到较好效果

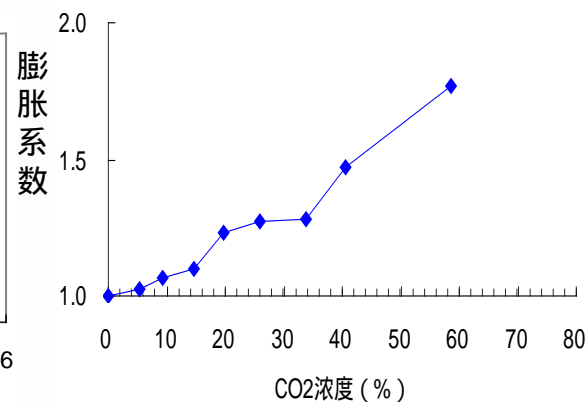
**室内实验评价：**细管实验表明，树101区块扶杨油层为非混相驱；CO<sub>2</sub>注入能力明显强于水驱，CO<sub>2</sub>驱启动压力梯度是水驱的37%；注CO<sub>2</sub>后地层原油膨胀能力较强，膨胀系数可达1.7以上



树101区块细管实验结果



启动压力梯度与渗透率关系



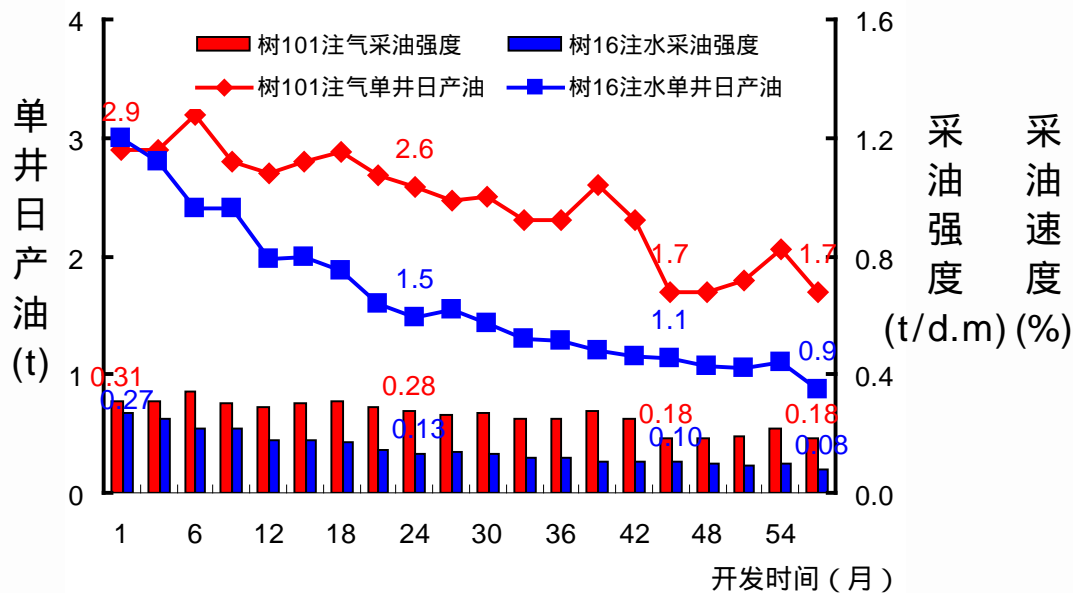
树101区块膨胀实验结果

# 矿场试验效果：

## ➤ 整体开发效果较好

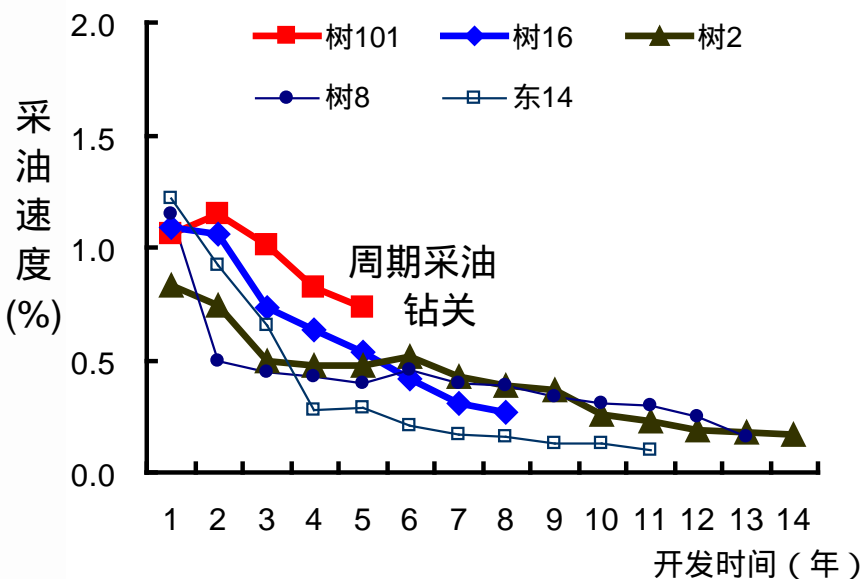
油井不压裂投产，初期单井日产油2.9吨，与压裂投产树16水驱区块相当。通过分类精细管理，采油速度连续三年保持在1%以上

采油强度一直高于树16水驱压裂投产区块



树101与树16注水区块油井生产情况对比图

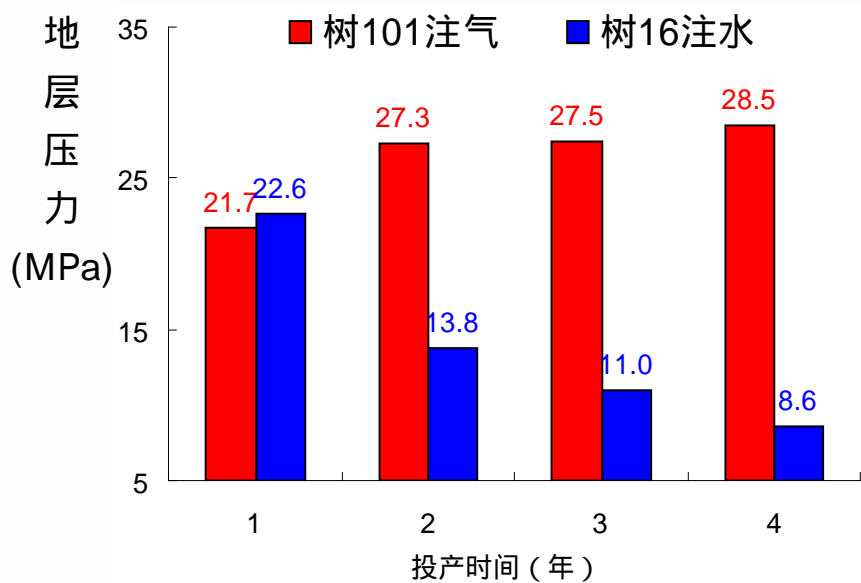
采油速度明显高于同类注水区块



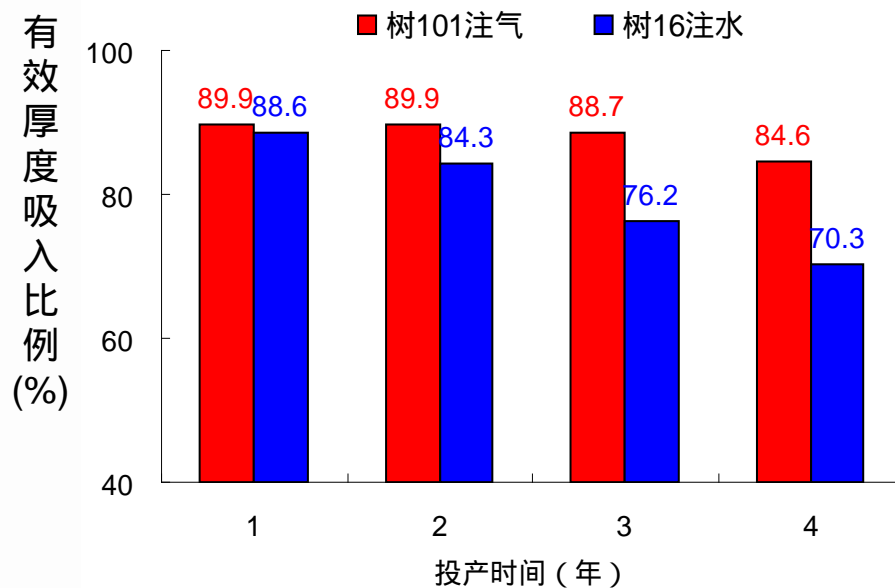
树101与同类水驱区块采油速度对比图

## ➤ 油层动用程度较高

采取超前注气6个月，油层吸气能力较强，地层压力保持水平达130%，有效厚度吸气比例在84.6%以上，明显高于同类注水区块



树101与树16注水区块地层压力对比图



树101与树16注水区块注入剖面对比图



## ► 预测采收率比水驱提高9个百分点

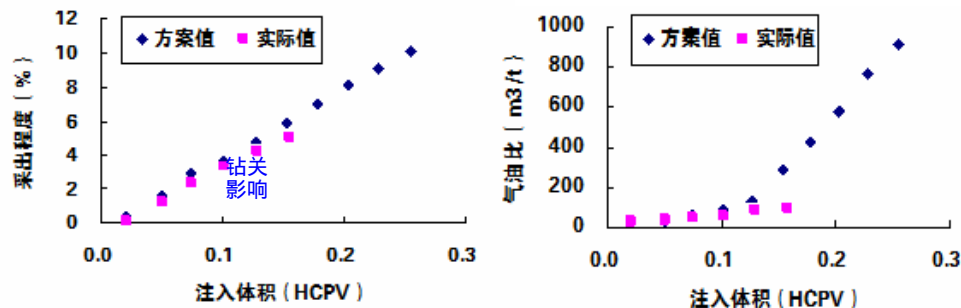
通过数值模拟预测，树101试验区5个主力油层二氧化碳驱采收率21%，树16区块采用递减曲线法预测最终采收率12%

树101试验区与树16注水区块生产数据对比表

区块	开发层位	开发方式	预测采收率 (%)	油井投产	单井射开有效厚度 (m)	阶段平均单井累积产油 (t)	阶段平均单井日产油 (t)
树101	YI6、YII4	CO <sub>2</sub> 驱	21.0	不压裂	9.3	3217	2.0
树16	YI5、YII5	水驱	12.0	压裂	11.1	2555	1.6

树101试验区预测采收率与方案对比表

指标	原油采收率提高值 (百分点)	油井平均单井阶段产油量高于水驱 (%)
方案要求	5.0	15.0
实际情况	9.0	26.0

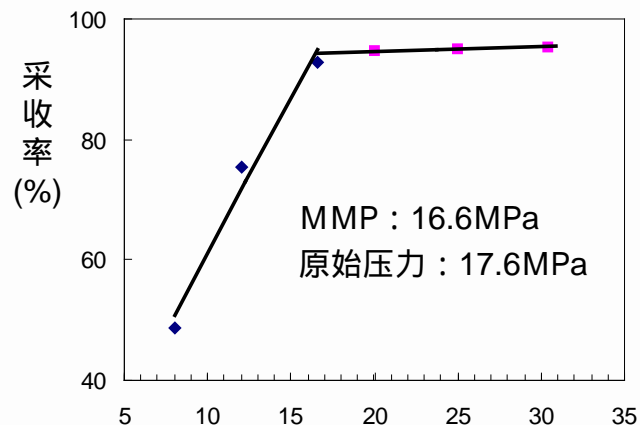


树101试验区实际采出程度、气油比与方案设计对比图

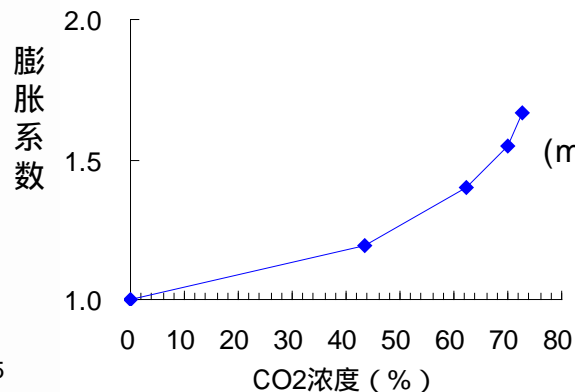


## (二) 混相驱的贝14试验区产量保持上升势头

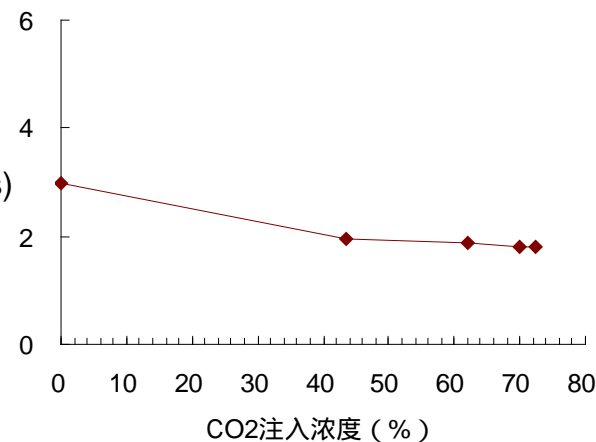
**室内实验评价：**细管实验表明，贝14区块兴安岭油层为混相驱；注CO<sub>2</sub>后地层原油膨胀能力较强，膨胀系数可达1.7，原油粘度可降低40%



贝14区块细管实验结果



贝14区块膨胀实验结果



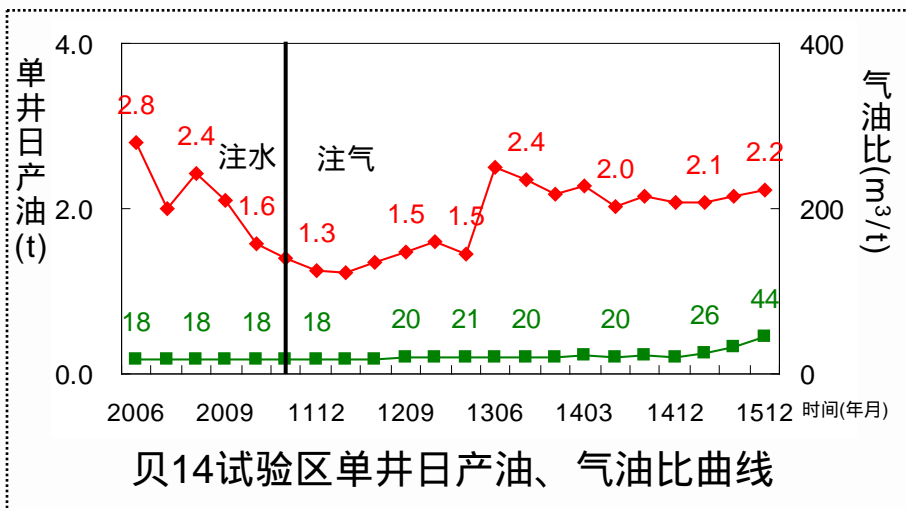
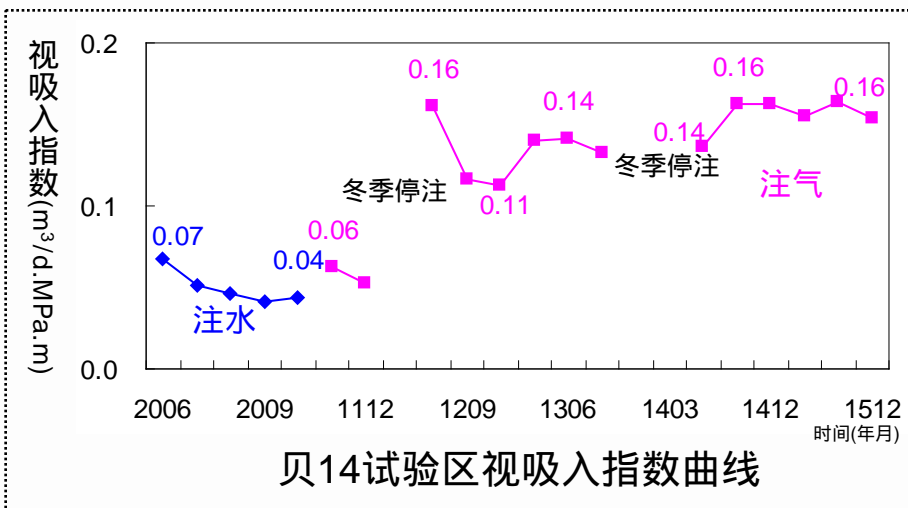
贝14区块粘度实验结果



# 矿场试验效果：

## ➤ 注采能力大幅提升

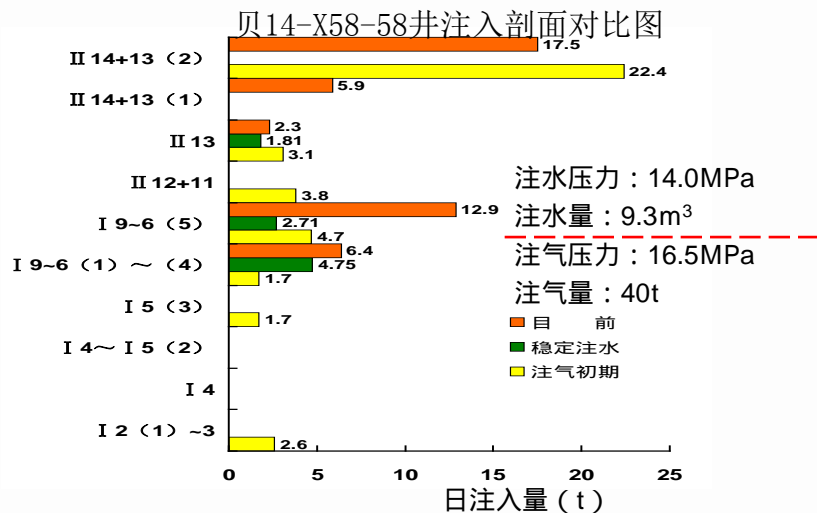
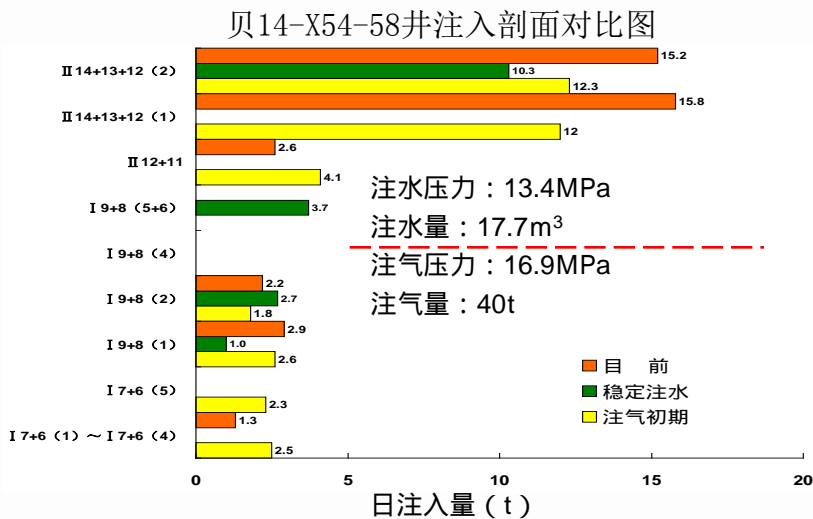
- 吸气能力保持在吸水能力的3倍以上
- 受效后日产油由1.2t上升到2t以上，并表现出稳中有升的趋势





# ➤ 储层动用状况变好

气驱动用层数和厚度比例为52.2%和67.0%，比水驱提高了17.4和15.0个百分点

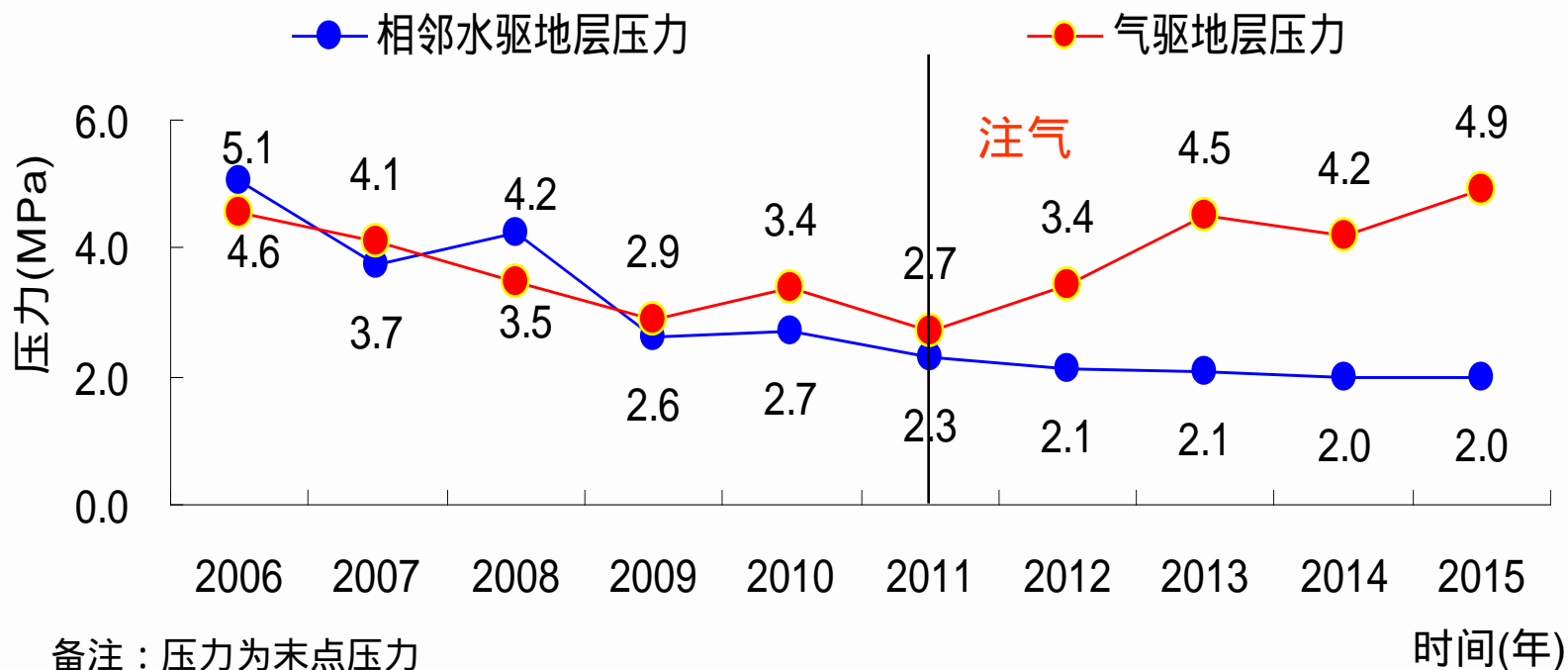


## 试验区不同类型受效井产出剖面分析表

受效类型	总层数 (个)	总厚度 (m)	受效前		受效后		差值			
			层数 (个)	厚度 (m)	层数 (个)	厚度 (m)	层数		厚度	
							层数 (个)	比例 (%)	厚度 (m)	比例 (%)
构造高部位受效	46	105.3	15	35.6	27	64.6	+12	+ 26.1	+ 29.0	+ 27.5
人工裂缝方向受效	42	63.8	20	26.3	24	41.2	+ 4	+ 9.5	+ 14.9	+ 23.4
同部和低部位受效	9	26.3	2	11.9	3	13.9	+ 1	+ 11.1	+ 2.0	+ 7.6
合计	97	195.4	37	73.8	54	119.7	<b>+ 17</b>	<b>+ 17.5</b>	<b>+ 45.9</b>	<b>+ 23.5</b>

## ➤ 地层压力逐步回升

气驱采油井地层压力逐步上升，比注气前上升了2.2MPa，比同期相邻水驱区块高2.9MPa

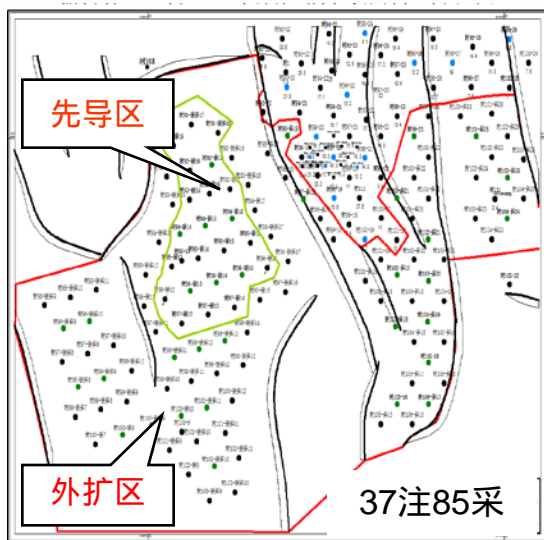


气驱与水驱采油井地层压力对比

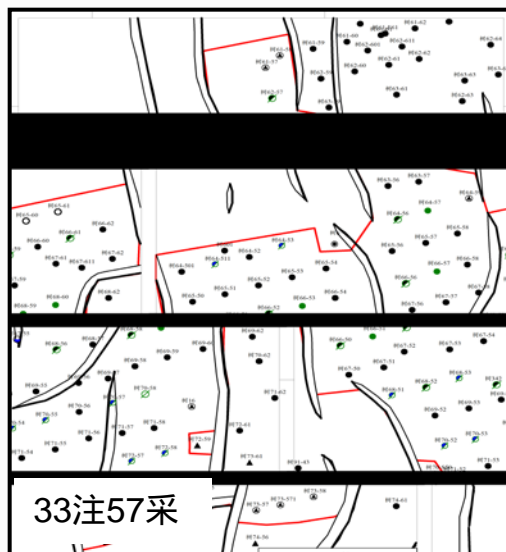
### (三) 工业化试验效果初显

为加快CO<sub>2</sub>驱技术攻关，2014年开展两个工业化矿场试验。设计注采井342口，最高年注气39.7万吨，最高年产油15.1万吨

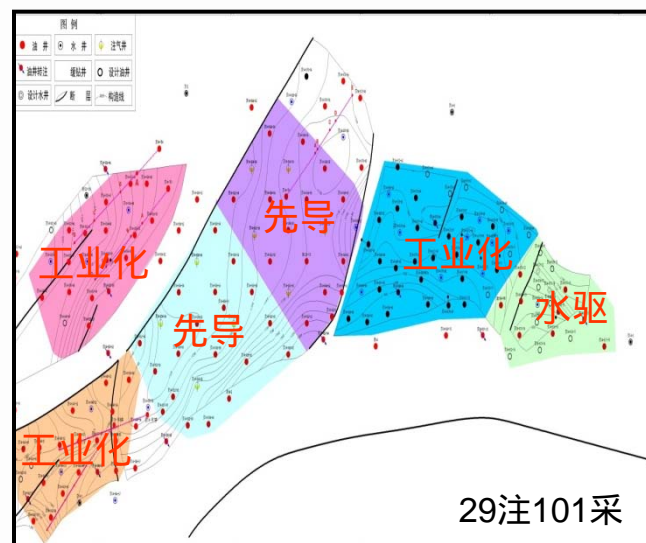
树101试验区构造井位图



树16试验区构造井位图



贝14试验区构造井位图

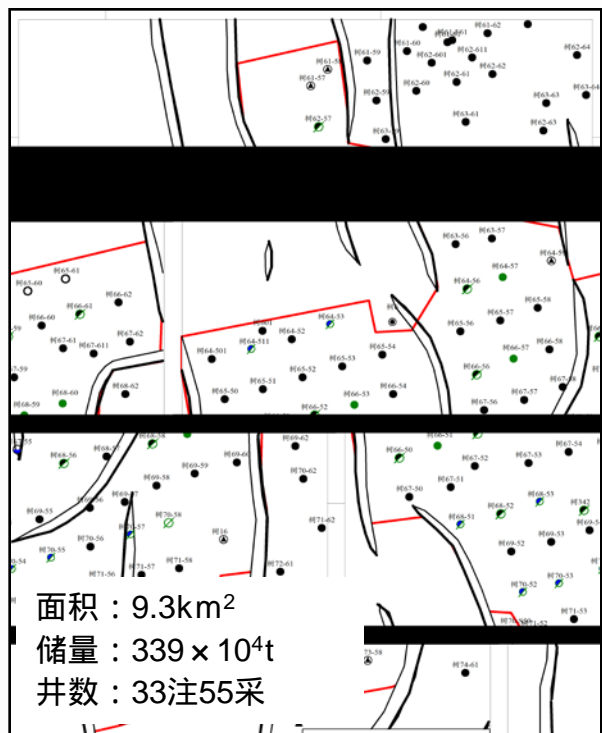


备注：树101、树16为同一工业化试验区的2个子区块

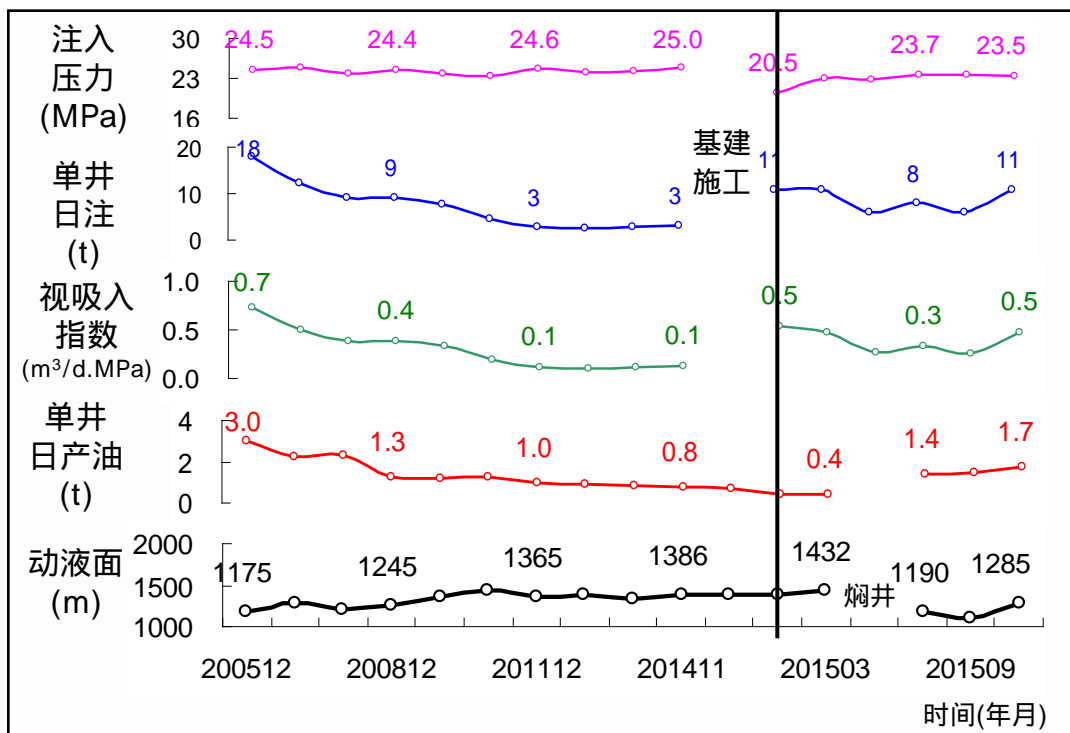


## ➤ 树16试验区注入能力明显提高，产量大幅上升

- ◆ 视吸入指数保持在水驱的3倍以上
- ◆ 地层压力由11.2MPa上升至16.2MPa
- ◆ 单井日产油由0.4t提至1.5t以上，提高2.7倍，气油比稳定在22m<sup>3</sup>/t



树16试验区井位图



树16试验区开采曲线



# 汇报提纲

一、二氧化碳驱研究背景

二、二氧化碳驱矿场试验效果

三、主要技术成果

四、存在的主要问题及下步攻关思路



在中国石油重大开发试验支持下，经过10多年的研究与试验，基本形成了特低渗透油藏CO<sub>2</sub>驱油藏、注采及地面工程三大技术系列，基本实践了CCS-EOR全过程

### CO<sub>2</sub>驱油藏工程技术系列

- CO<sub>2</sub>驱开发设计技术
- CO<sub>2</sub>驱开发调整技术

### CO<sub>2</sub>驱注采工程技术系列

- CO<sub>2</sub>驱注采工艺技术
- CO<sub>2</sub>驱封窜技术
- CO<sub>2</sub>驱注采井腐蚀防护技术

### CO<sub>2</sub>驱地面工程技术系列

- CO<sub>2</sub>管道输送及注入工艺技术
- CO<sub>2</sub>驱采出流体集输及处理技术

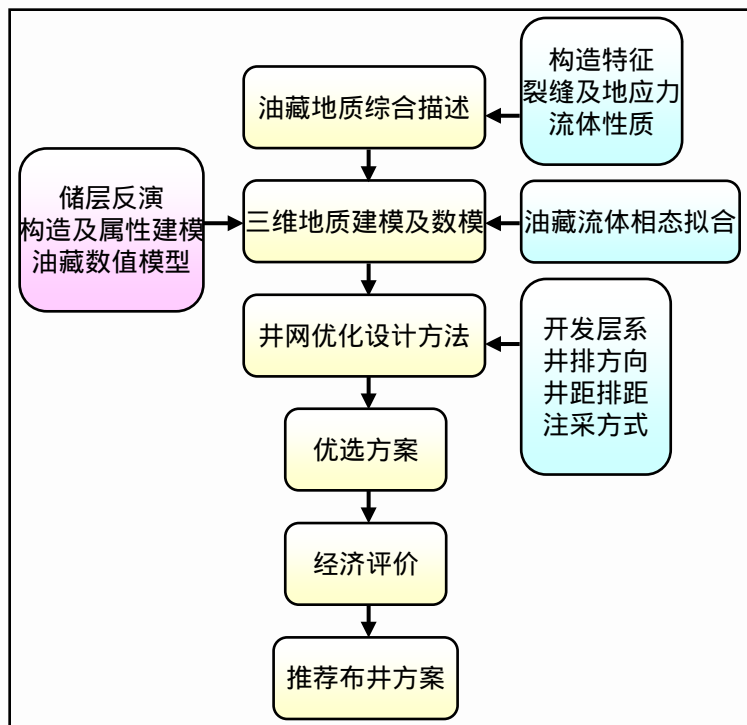
建成了室内实验设备30余台/套，具备较强测试与研发能力，初步形成了CO<sub>2</sub>驱油配套标准及技术规范



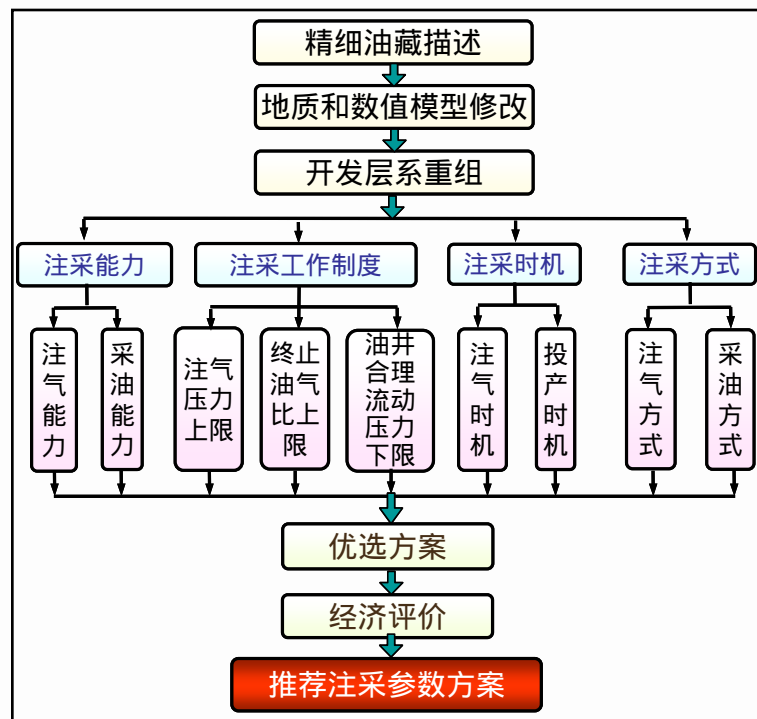
# (一) 形成了CO<sub>2</sub>驱开发设计技术

综合储层地震预测、室内物模实验、三维地质建模和数值模拟成果，以提高单井产量和采收率、有效控制气窜为目标，优化设计了CO<sub>2</sub>驱井网和注采参数

### CO<sub>2</sub>驱井网优化设计流程图



### CO<sub>2</sub>驱注采参数优化设计流程





## (二) 初步形成了CO<sub>2</sub>驱开发调整技术

在不同注气阶段，针对不同类型井组进行精细调整，确保试验效果。油井见气后，根据井组气油比、注采比等指标，对注气井实施周期注气；对采油井实施分类管理，提高流压。随着气油比的进一步升高，研究了水气交替、周期注采、化学调剖等控窜封窜技术

树101试验区油井见气初期分类管理情况表

油井分类	气油比 (m <sup>3</sup> /t)	流压 (MPa)	生产制度	生产情况
一类	>300	>10	自喷	2口井，单井日产油2.6t，气油比322.8m <sup>3</sup> /t
二类	150-300	7-10	采10天关10天	1口井，单井日产油2.4t，气油比183m <sup>3</sup> /t
三类	75-150	5-7	采10天关5天	3口井，单井日产油2.6t，气油比94.1m <sup>3</sup> /t
四类	<75	<5	连续生产	8口井，单井日产油1.4t，气油比46.3m <sup>3</sup> /t

### (三) 初步形成了CO<sub>2</sub>驱注采工艺技术

研发了CO<sub>2</sub>笼统、分层注入工艺，可实现笼统注入和2-3层分层注入；研发了CO<sub>2</sub>驱高效举升工艺，井下气液高效分离，可满足高气油比举升



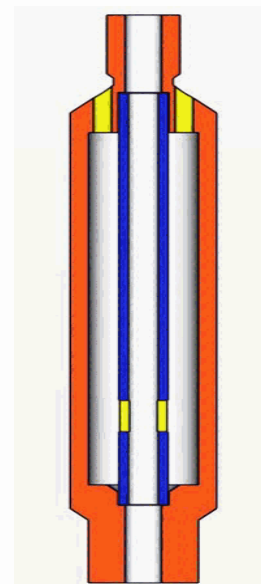
注入井井口



注气封隔器



采油井井口






井下气液分离装置



## (四) 探索了CO<sub>2</sub>驱封窜技术

### ■ 针对不同的气窜类型研发了四套封窜配方体系

体系名称	体系图片	适用气窜类型	性能特点
耐酸泡沫剂		注入井主力层突进 及干砂岩吸气	<ul style="list-style-type: none"><li>● pH = 3</li><li>● 膨胀系数4.8</li><li>● 半衰期192h</li></ul>
耐油泡沫剂		采油井主力层突进 及干砂岩吸气	<ul style="list-style-type: none"><li>● pH = 3、含油60%</li><li>● 膨胀系数4.3，半衰期83h</li><li>● 阻力因子120</li></ul>
耐高温凝胶		采油井压裂裂缝	<ul style="list-style-type: none"><li>● 热稳定性、抗剪切性良好</li><li>● 成胶强度3000 ~ 10000mPa.s</li><li>● 成胶时间5 ~ 10d可控</li><li>● 120 放置3个月粘度损失率仅5%</li></ul>
双激发凝胶		采油井天然裂缝	<ul style="list-style-type: none"><li>● 初始粘度仅3mPa.s</li><li>● 固化后抗压强度2.1MPa</li><li>● 固化时间3 ~ 8d可控</li><li>● 可酸化解堵</li></ul>

## ■措施取得较好控气窜效果，措施后产量上升，气油比明显下降

现场试验9口井，前期完成的7口试验井已见到了明显的增油降气效果。平均气油比由471m<sup>3</sup>/t下降到99m<sup>3</sup>/t，连通油井平均增油716t，平均有效期大于14个月

现场试验效果统计表

井别	井号	压力升幅 (MPa)	连通 油井数 (口)	气油比 (m <sup>3</sup> /t)		累计增油 (t)	有效期 (月)
				措施前	措施后		
注气井	树96-碳15	5.8	4	256.8	85.8	999	> 15
	树96-碳13	4.8	8	269.4	61.2	652	> 11
	树94-碳14	5.7	6	309.5	52.2	747	> 13
	树94-碳16	3.8	6	229.0	69.4	钻关	/
	树94-碳15	6.0	7	276.0	51.3	钻关	/
	芳188-138	3.5	5	246.0	85.0	467	> 17
采油井	芳190-140	/	/	1714.0	289.6	142	> 18
平均		4.9	6	471.5	99.2	716	> 14



## (五) 探索了CO<sub>2</sub>驱注采井腐蚀防护技术

研制了新型缓蚀剂配方，优化了使用浓度，缓蚀率在98%以上，现场应用65口井取得了较好的防护效果

缓蚀剂效果评价表

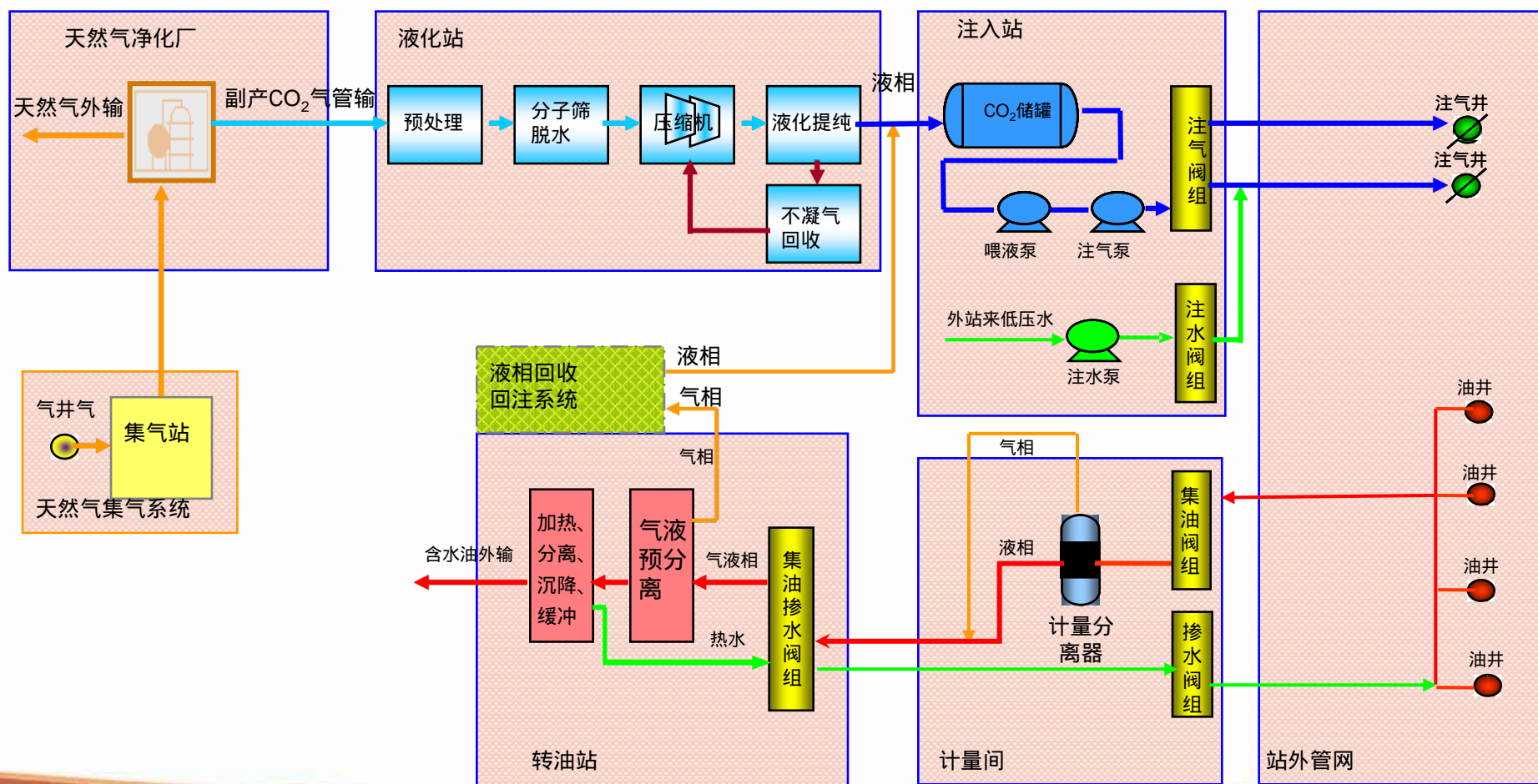
材质		N80		P110		J55	
108 、 CO <sub>2</sub> 分压5.0MPa、 缓蚀剂 BUCT-Y	缓蚀剂浓度 (ppm)	腐蚀速率 (mm/a)	缓蚀率 (%)	腐蚀速率 (mm/a)	缓蚀率 (%)	腐蚀速率 (mm/a)	缓蚀率 (%)
	空白	3.1440	/	4.6246	/	3.7809	/
	500	0.0860	97.2	0.0578	98.7	0.0373	99.0
	1000	0.0618	98.0	0.0382	99.1	0.0312	99.1
	3000	0.0321	98.9	0.0187	99.6	0.0268	99.3

缓蚀剂现场试验

井别	井数(口)	含水(%)	加注制度		采出液腐蚀速率小于 ( $\mu\text{m/a}$ )	备注
			单井加药量 (Kg)	周期 (天)		
采出井	5	>50	15	5	0.171	含水>50%以上6个月，试验初期无明显腐蚀

## (六) 形成了CO<sub>2</sub>驱配套地面工艺技术

以全流程密闭生产为目标，攻关形成了CO<sub>2</sub>管道输送、CO<sub>2</sub>液相注入、采出流体及处理技术





# 汇报提纲

- 一、二氧化碳驱研究背景
- 二、二氧化碳驱矿场试验效果
- 三、主要技术成果
- 四、存在的主要问题及下步攻关思路





## (一) 存在的主要问题

一是大庆外围油田最小混相压力普遍较高，需研究提高混相程度的方法。目前已开展外围扶杨油层细管实验13口井，平均MMP为35.7MPa

二是气源是制约规模化应用的主要瓶颈，需要探索规模化开发的气源保障方式

三是常规采油、地面工艺成本高，需要探索经济高效的工艺技术



## (二) 下步攻关思路

围绕“保混相、控气窜、提效果、降成本”目标，从油藏、采油、地面三大工程进行系统攻关，形成具有大庆油田特色的CO<sub>2</sub>驱技术系列

- **油藏工程**：研究降低MMP的方法，深化油藏模拟技术，发展综合调整及二氧化碳驱效果评价技术
- **采油工艺**：进一步完善注采井防腐、分注、低成本封窜、压井、高气液比举升等工艺技术，形成标准规范
- **地面配套**：跟踪已建和新建系统的适应性，研究耐蚀非金属管道的适应性及处理设备内防腐技术，优化工艺和参数，研制配套药剂

汇报有不当之处

请各位领导、专家批评指正

道贺新年