

第 80 期：使用 CMG-GEM 模拟二氧化碳驱操作流程

Builder/GEM/Results 2017.10

编写人：吴晓云

很多人了解并开始使用 CMG，是从 STARS 开始的，说到 IMEX 和 GEM 便无从下手了，GEM 模型要如何创建？CO₂ 混相驱机理要如何设置？需要输出哪些结果？这些是初次接触 GEM 常常遇到的，我们先来聊一聊这些问题。

大家都有这样的共识—不同的数值模拟软件具有普遍的相似性，事实上，这种普遍的相似性在不同的模拟器之间也存在，其中 80~90% 的设置是相似的，区别主要集中于流体模型即 Components 部分。

CO₂ 混相驱过程中，可能发生溶解、膨胀、混相或非混相、沥青质沉积、相渗滞后、润湿反转、扩散和弥散、水溶气、液态 CO₂ 冷伤害、离子交换、矿物质盐析和溶解等现象。面对这么多的机理表征，大家显得无所适从，所以，把握主次才最为关键！首先，从最基础的模拟出发，溶解、膨胀，混相或非混相模拟是最重要的了，而这些机理的表征 EoS 已经为我们全权代劳了，做 CO₂ 驱的小伙伴们可以轻松上阵了。其次，如果通过室内实验或者现场以及流体分析，还存在沥青质沉积、相渗滞后、润湿反转等现象，我们可以在基础模型上通过一系列的关键字定义即可表征。

做 CO₂ 驱或天然气驱过程中，最小混相压力是大家关注的首要参数，也是比较纠结的一个参数，巴不得直接把它丢给模型，达到“超过该压力，驱油百分百”的效果。但是，在实际的驱替过程中可不是如此简单，模拟器也不是根据这个最小混相压力去触发 100% 驱油效率，而是以一种更加聪明的方式来模拟的。混相是什么？简单来说，消除界面，那就是界面张力降为 0。GEM 中计算界面张力的参数是等张比容 (PCHOR)。而关联界面张力和驱油效率，可以借助 IFT（界面张力）效应来实现。那么，MMP 就不用关注了吗？也不是，MMP 有各种经验公式和测定方法，业内比较认可和比较常用的细管实验法，虽然测定的方法也会受到细管长度、孔、渗等各种因素的影响，但是如果我们认可最小混相压力，在 2017 版 WinProp 新增了对它的拟合功能，可以微调 Ω_A 和 Ω_B 以及注入气与重组分的二元交互作用系数，同时需监测其他实验数据的拟合精度。

创建好模型之后，还有很关键的一点，到底我要关注 CO₂ 驱哪些结果呢？输出结果是帮助我们展示各种机理和开发效果的。举个例子，热采开发我们的关注点是热带来的影响，首先是温度和降粘，那么我们肯定要输出温度场和粘度场。CO₂ 呢，可以降粘、改变界面张力，我们可以输出粘度场、摩尔分数场和界面张力场展示 CO₂ 驱效果，更多的输出也是一样，都是为了说明问题而服务的。如果你还是不知道哪些是必要的，可以参考一些算例或权威文献中的出图。

初学者还会纠结一个问题，CO₂ 驱会做了，那 CO₂ 吞吐怎么做呢？相似性来帮你，参考蒸汽吞吐的循环井组设置（第 15 期：如何采用井组进行蒸汽吞吐周期自动转换设置和）和 TRIGGER 设置（第 47 期：TRIGGER(触发)功能的使用方法），只需将注入介质由蒸汽改为气就可以了。

本文借助第 69 期讲义的流体，对 Builder 创建 CO₂ 驱 GEM 模型流程进行详细介绍。

第一步，创建衰竭开采预测模型，在基础模型中导入拟合好的流体模型*.gem,;

第二步，创建水驱模型，作为 CO₂ 开发效果的对比基础；

第三步，创建 CO₂ 驱 WAG 模型，应用 Group 进行气水交替设置；

第四步，衰竭、水驱、WAG 开发效果对比；

涉及的主要知识点有：1 使用 Group 设置气水交替模拟；2 复制井功能，常用于设置吞吐井、气水交替井或分层开采井的模拟；3 绘制等值面图。

与本期相关讲义：

第 15 期：如何采用井组进行蒸汽吞吐周期自动转换设置

第 47 期：TRIGGER（触发）功能的使用方法

第 48 期：STARS-Builder 软件基础操作，第 64 期：CMOST 操作实战之优化

第 69 期：CO₂ 混相驱 PVT 拟合计算，《公开课第 8 课：Results Graph 应用技巧》

目 录

| | |
|--|----|
| 1. 创建衰竭开采预测模型..... | 3 |
| 2. 创建水驱预测模型..... | 5 |
| 3. 创建 CO ₂ -WAG 预测模型 | 6 |
| 4. 衰竭、水驱、CO ₂ -WAG 开发效果对比 | 10 |
| 5. 三个模拟器模拟 CO ₂ 驱的区别 | 12 |

1. 创建衰竭开采预测模型

本期使用的基础模型“GEM_5spot_Basic.dat”中是一个五点井网模型，创建过程可参考 48 期讲义，不做过多描述。Components（流体模型）部分 GEM 与 STARS 不同，STARS 使用 K value 模拟相态平衡，所需参数较为简单，大部分皆可在 Builder 界面自行定义。而 GEM 模拟是基于状态方程 (EoS) 计算，所需参数复杂且抽象，通常是借助 WinProp 做 PVT 拟合，然后输出流体模型参数，参考 69 期讲义。

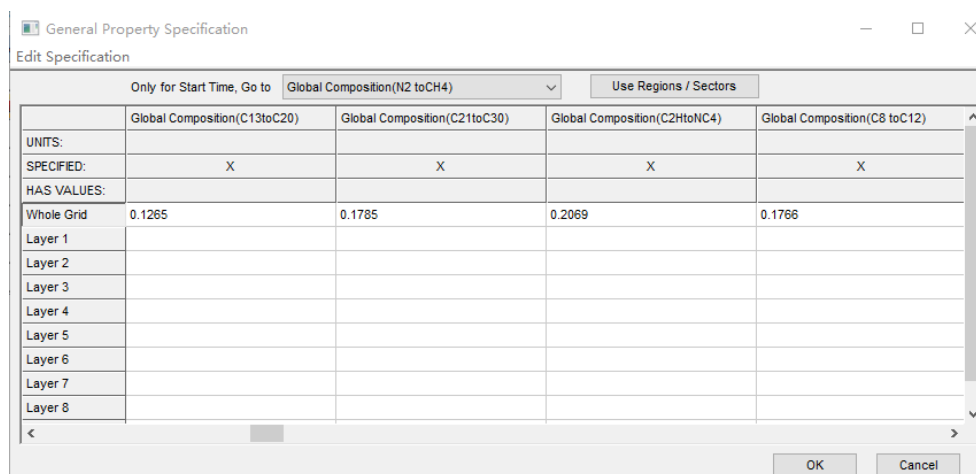
1) 基础模型参数如下：

| | |
|----------------|---|
| 油藏描述 | <ul style="list-style-type: none"> ✧ 纵向上有 8 个小层，均为油层 ✧ 模型深度为 1800-1824m ✧ 平面渗透率和垂向渗透率为 400 mD ✧ 孔隙度为 0.24 |
| 组分定义 (稍后添加) | <ul style="list-style-type: none"> ✧ 有 7 个拟组分 ✧ 流体模型由 WinProp 生成，参考 69 期讲义 |
| 岩石-流体 | <ul style="list-style-type: none"> ✧ 实验室测得相渗曲线 |
| 初始化 | <ul style="list-style-type: none"> ✧ 重力毛管力平衡法，仅油水两相 ✧ 参考深度 1800 m，参考压力 18000 kPa，油水界面 1827 m |
| 井和动态数据 | <ul style="list-style-type: none"> ✧ 5 口井：TT1/2/3/4 和 Injector，构成了五点井网，Injector 关井 ✧ 生产井约束条件：STL 200 m³/day，BHP 7000 kPa ✧ 将 5 口井设置为 Inner Wells 井组，方便对其进行井组控制，参考第 15 期讲义 |

- 2) 准备流体模型。在 69 期讲义基础上通过进一步的回归拟合（文件 **4-MiscLumping_Reg-ff.dat**），并输出流体模型（文件 **7-GEM.gem**）。
- 3) 点击树视图中 **Components** → **Import WinProp-generated Model**，在弹出对话框中选择 7-GEM.gem。因 Builder 未能识别 VSHIF1 和 TREFVS，需要手动将两个关键字粘贴至 VSHIFT 关键字后面。如果熟悉 CMG 关键字系统，可直接编辑*.dat 文件，将 7-gem.gem 中的关键字全部粘贴至流体描述位置。
- 4) 此时树视图中显示 **Reservoir**，这是因为流体模型中的组成并未导入，需要补充定义。点击 **Reservoir**，在树视图下方区域找到



- 5) 双击其中一个参数，即可打开定义界面。也可通过 Builder 主界面上方的 **Specify Property**，在下拉菜单找到 Global Composition（IC5toC7）等参数，并逐个定义，OK 两次。



Global Composition（油藏流体组成）数据就是在 WinProp 中合并后的 Composition，也可以在*.GEM 文件的开头，找到**COMPOSITION *PRIMARY，

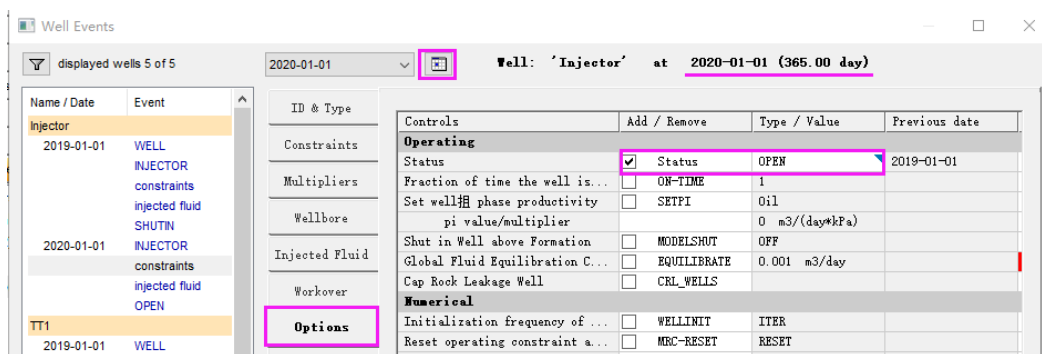
对应一一输入。这里的组分'H2StoCO2'是在 WinProp 中合并得来的，因 H2S 含量较低，已用 CO₂ 的属性替换，因而本期讲义中，'H2StoCO2'即代表 CO₂。

- 6) 另存为衰竭开采预测模型 “**GEM 5spot Pred.dat**”，回到 Launcher 界面，用鼠标将该文件拖至 GEM 模拟器，提交计算，稍后进行对比。

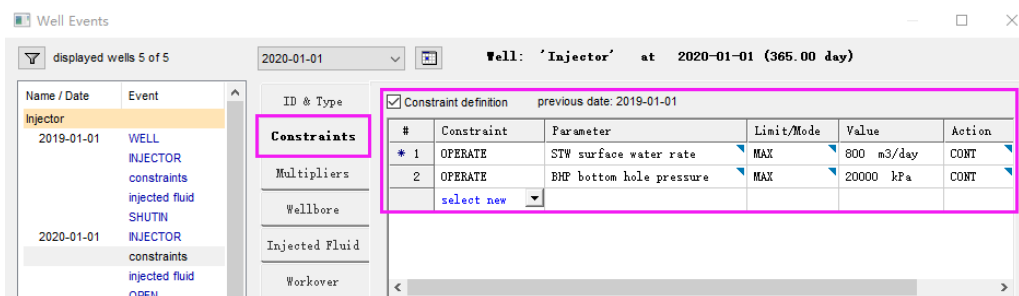
2. 创建水驱预测模型

在 CO₂ 驱效果评价中需计算增油量和换油率等开发指标，这些都是以水驱预测作为基础。因衰竭开采预测模型压力下降较快，需能量补给，计划在 2020 年 1 月 1 日开始水驱。如何把握注水时机，这又是另一个课题，这里不做讲解。

- 7) 启动 CMG Launcher，用鼠标将 “**GEM 5spot Pred.dat**” 拖至 Builder，并另存为 “**GEM 5spot Watflooding.dat**”。
- 8) 点击 **Wells & Recurrent**，双击 Wells 下的 **Injector**，在弹出的页面上方时间栏选择 2020-1-1。
- a) 点击 **Options**，将 Status 改成 **OPEN**，点击页面右下角 Apply;



- b) 点击 **Constraints**，激活 Constraint definition，设置 **STW 800 m3/day**，**BHP 20000 kPa**，OK。

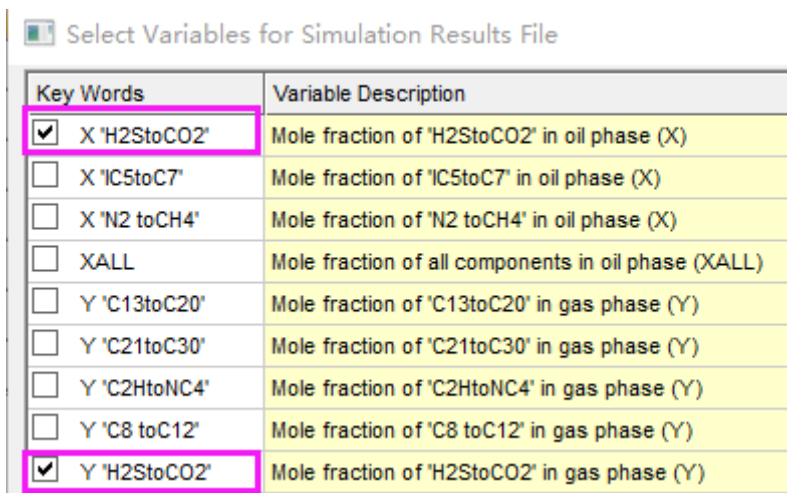


9) 保存文件，回到 Launcher 界面，用鼠标将该文件拖至 GEM 模拟器，提交计算。

3. 创建 CO₂-WAG 预测模型

水气交替驱 (Water-Alternating-Gas, 即 WAG) 是常见的 CO₂ 驱开发方式。WAG 驱交替注入水段塞和气段塞，能够有效减弱由于油气粘度差而产生的气体指进，控制气窜并延长气体突破时间，因而比较推崇。GEM 实现 WAG 驱的方法有两种，Group 控制或者 Trigger 控制。这里介绍前者，后者在《第 47 期：TRIGGER (触发) 功能的使用方法》讲义有详细说明，见第 10 页实例 2。

10) 启动 CMG Launcher，用鼠标将 “**GEM 5spot Watflooding.dat**” 拖至 Builder，并另存为 “**GEM 5spot WAG.dat**”。点击 **I/O Control** → **Simulation Results Output**，在 **OUTSRF** 部分选择输出 CO₂ 在油和气相的摩尔分数。OK。



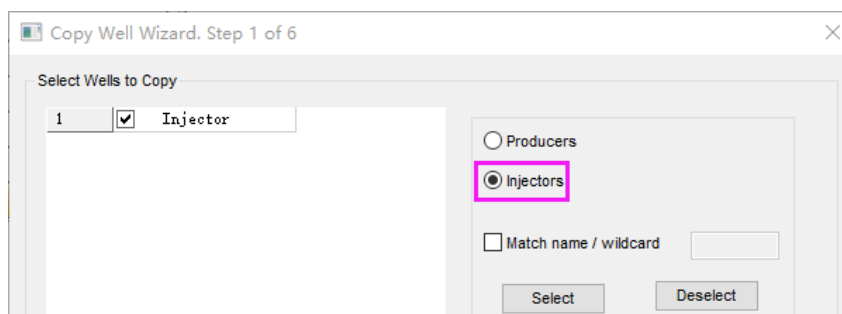
| Key Words | Variable Description |
|--|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> X 'H2StoCO2' | Mole fraction of 'H2StoCO2' in oil phase (X) |
| <input type="checkbox"/> X 'IC5toC7' | Mole fraction of 'IC5toC7' in oil phase (X) |
| <input type="checkbox"/> X 'N2 toCH4' | Mole fraction of 'N2 toCH4' in oil phase (X) |
| <input type="checkbox"/> XALL | Mole fraction of all components in oil phase (XALL) |
| <input type="checkbox"/> Y 'C13toC20' | Mole fraction of 'C13toC20' in gas phase (Y) |
| <input type="checkbox"/> Y 'C21toC30' | Mole fraction of 'C21toC30' in gas phase (Y) |
| <input type="checkbox"/> Y 'C2HtoNC4' | Mole fraction of 'C2HtoNC4' in gas phase (Y) |
| <input type="checkbox"/> Y 'C8 toC12' | Mole fraction of 'C8 toC12' in gas phase (Y) |
| <input checked="" type="checkbox"/> Y 'H2StoCO2' | Mole fraction of 'H2StoCO2' in gas phase (Y) |

11) 打开 **Numerical** 部分，选择时间 **2020-1-1**，最大时间步 **DTMAX** 为 15.0，保证计算气水交替时最大的时间步长不超过 15 day，保证模拟精度。OK。

| Keyword Description | Default ... | Dataset Value | Set At... |
|---|-------------|---------------|-----------|
| Timestep Control Keywords | | | |
| Maximum Number of Timesteps (MAXSTEPS) | 99999 | | |
| Maximum Simulation Time (MAXTIME) | 7305 | | |
| Maximum Simulation Date (MAXDATE) | 2039-01-01 | ... | |
| Maximum Time Step Size (DTMAX) | 365 day | 15 day | |
| Minimum Time Step Size (DTMIN) | 1e-005 day | 1.0e-10 day | 2019-0... |
| First Time Step Size after Well Change... | 0.01 day | 0.01 day | 2019-0... |
| Maximum CPU Seconds (MAXCPU) | | | |

12) 为了方便控制，用一口注气井和一口注水井交替开关井进行气水交替模拟。
 首先注水井的位置创建一个注气井，然后进行气水交替注入设置。具体操作如下：点击 **Wells & Recurrent** → **Copy Well**,

a) 在弹出的对话框中，选择 **Injectors**, **Next**;

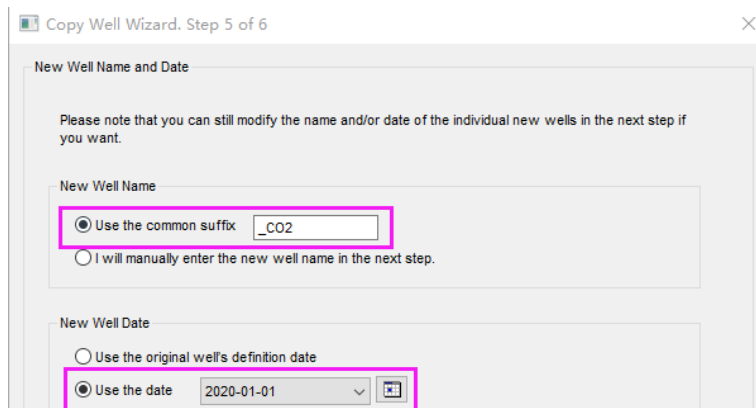


b) 复制所有的完井信息，**Next**;

c) 复制所有的几何因子，包括表皮因子、井径等，**Next**;

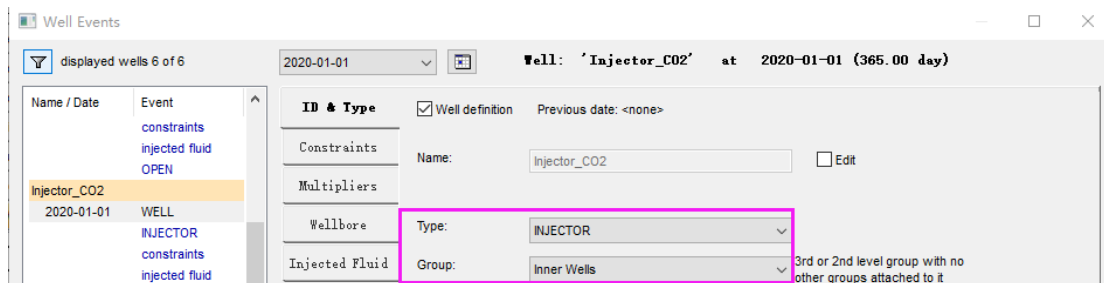
d) 复制井轨迹，因被复制井 **Injector** 没有井轨迹，略过，**Next**;

e) 井名后缀改为 **_CO2**，时间 **2020-1-1**，**Next**;

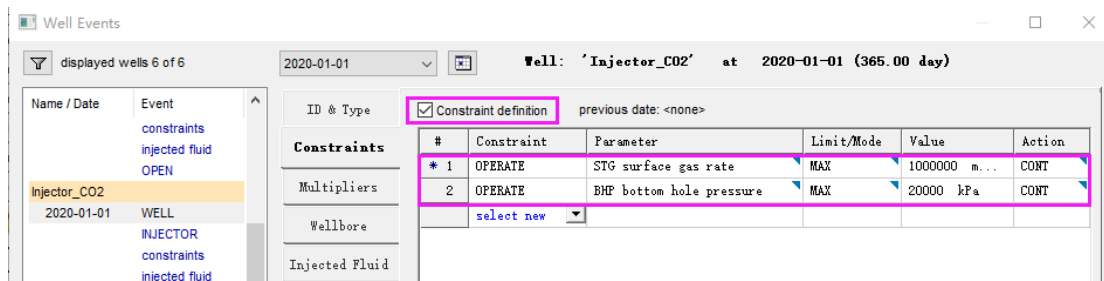


f) 检查前面的设置，无需更改，点击 Finish，完成复制井操作。

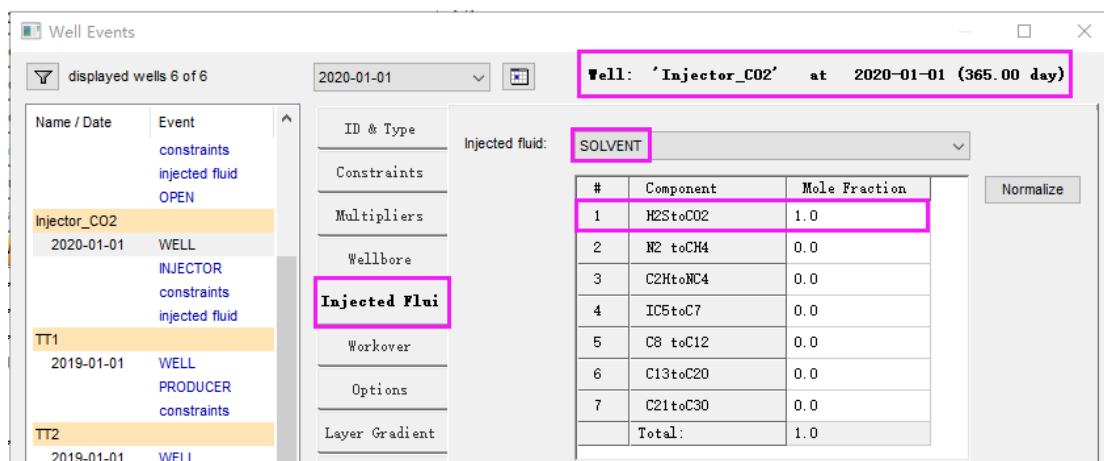
13) 树视图中双击 **Injector_CO2**，井类型设置为 **INJECTOR**，Group 选择 **Inner Wells**，Apply。



14) 注气井的控制条件为 **STG 1.0e6 m³/day**，**BHP 20000 kPa**，Apply。



15) 注入纯 CO₂。点击 **Injected Fluid**，注入流体类型选择 **SOLVENT**，'H2StoCO2'的摩尔分数为 **1**，Apply。注气井设置完成。



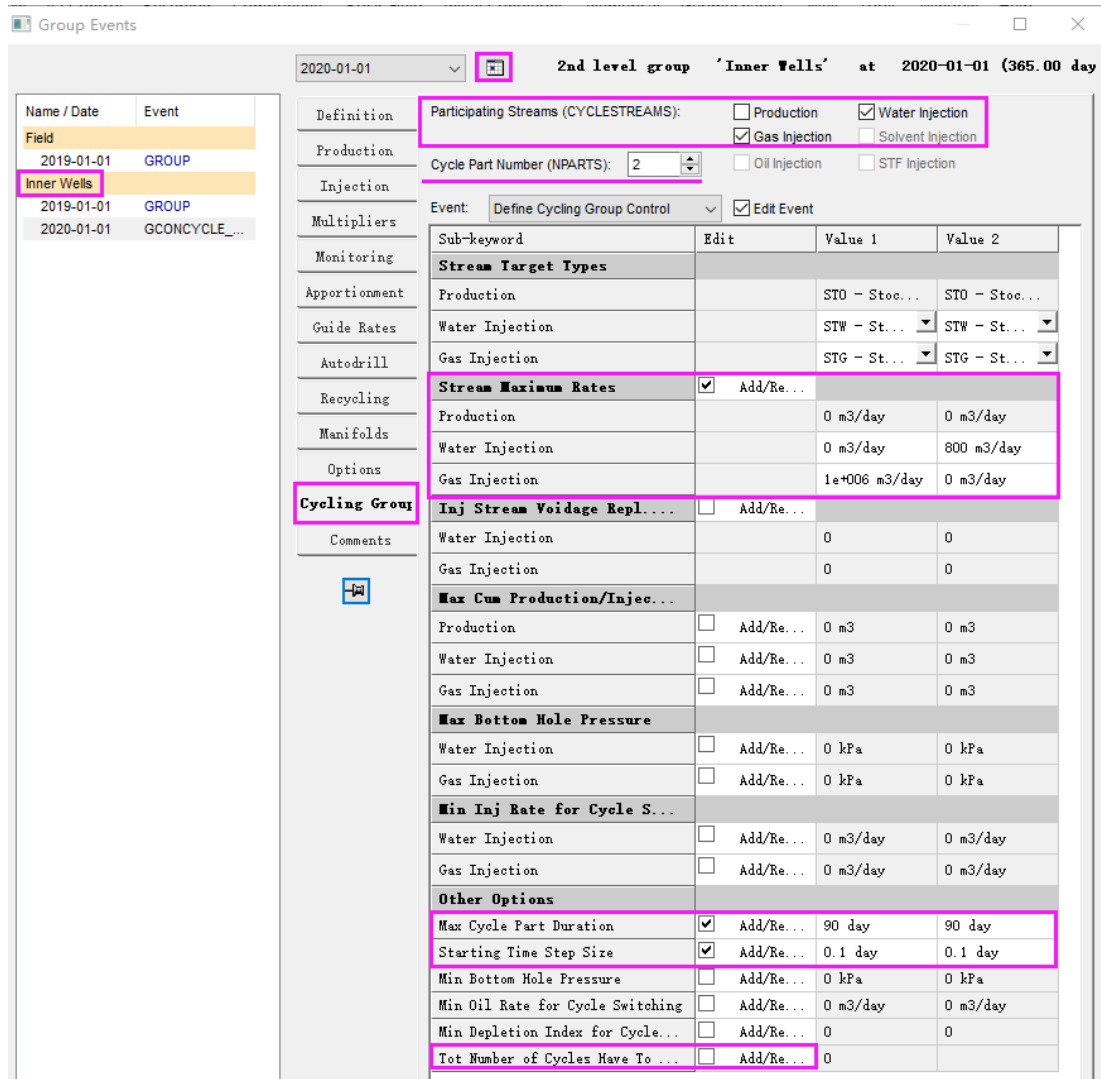
16) 接下来，用 Group 的方式设置气水交替控制。双击 **Groups (2)**，

- a) 点击 **Inner Wells**，在页面顶部选择气水交替时间，**2020-01-01**。
- b) 点击 **Cycling Group**。气水交替过程中，仅需控制注入井的交替，生产

并保持开井状态无需控制，在 **Participating Streams** 中去掉 Production;

- c) WAG 分为注气和注水两个阶段，**NPARTS** 改为 2。第一阶段（Value 1 列）注气，第二阶段（Value 2 列）注水；
- d) 激活注入速度设置。注水量分别为 0 和 800（单位自动填写，无需输入），注气量分别为 1.0e6 和 0；
- e) 激活 **Other Options** 的时间，注气、水时间段均为 90 day，起始时间步长均为 0.1 day；
- f) 如需设置段塞数，可激活最后一个选项 Tot Number，这里持续气水交替，不设置该值。OK。

17) 气水交替模型设置完成，检查水气交替注入设置是否正确。保存文件，将该文件拖至 GEM 模拟器计算。




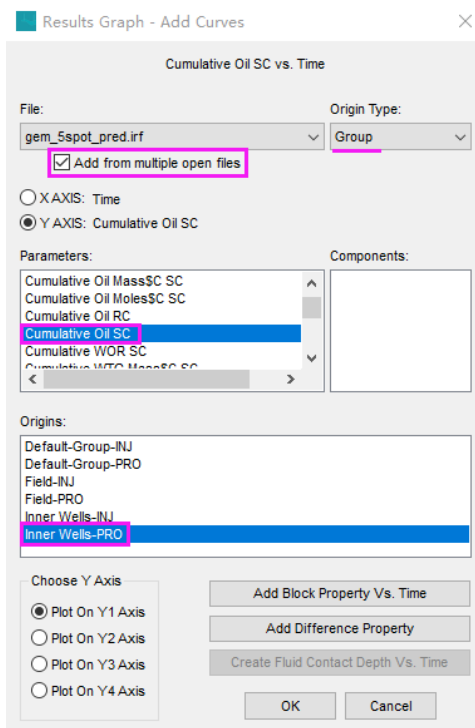
4. 衰竭、水驱、CO₂-WAG 开发效果对比

以上即为 CO₂ 驱模拟的一套完整流程，可参考第 64 期讲义，通过 CMOST-OP（参数优化）功能实现注采参数的优化。这里我们对初步的方案进行开发指标对比。

18) 在 Launcher 界面，用鼠标将 **GEM_5spot_pred.irf** 拖至 Results Graph 模块。

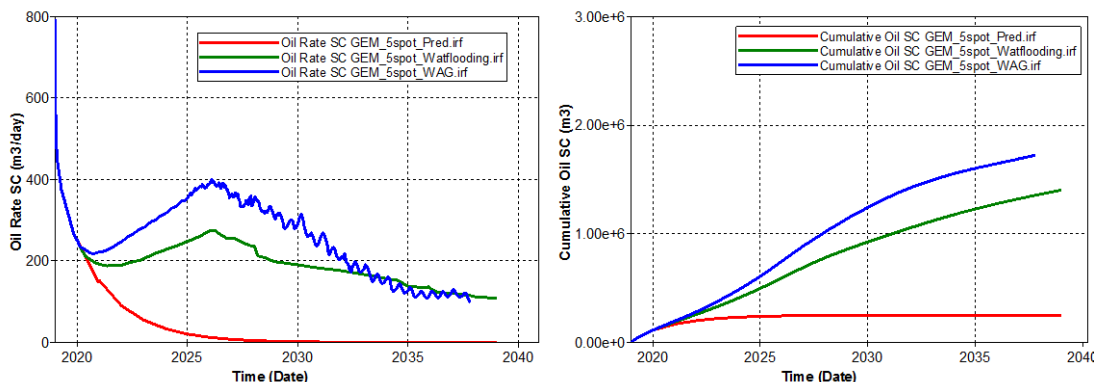
点击 **File** → **Open CMG Simulation Results Files**，在弹出的对话框中用 **Ctrl** 选择 **GEM_5spot_Watflooding.irf** 和 **GEM_5spot_WAG.irf** 两个文件，这样可同时绘制三个结果文件的曲线。

19) 点击  加载曲线，在弹出的对话框中，添加多个打开文件（**Add from multiple open files**）的井组（GROUP）曲线，在 Parameters 中，使用 Ctrl+鼠标左键选择日产油（Oil Rate SC）和累产油（Cumulative Oil SC），OK。



20) 在弹出的对话框中，选中另外两个文件，这样同时绘制三个文件的累产油曲线进行不同开发方案的对比。

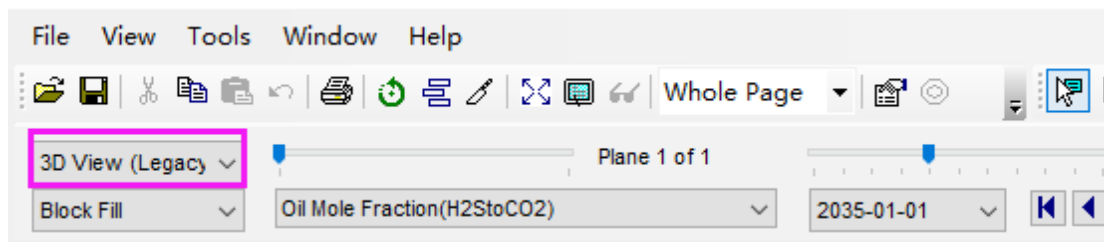
21) 以产油量来看，WAG 能够明显提高水驱的原油采出程度。参考《公开课第 8 课：Results Graph 应用技巧》，可进行曲线美化等操作。



22) 通过输出 CO₂ 在油相中的摩尔分数，可查看其动态变化过程。在 Launcher 界面，用鼠标将 **GEM_5spot_WAG.irf** 拖至 Results 3D 模块。点击下拉属性菜单找到 Oil Mole Fraction (H2StoCO2)。选择层位，拖动时间条，可以查看任意时间任意平面或剖面图。

23) 绘制 CO₂ 在油相中摩尔分数的等值面图。

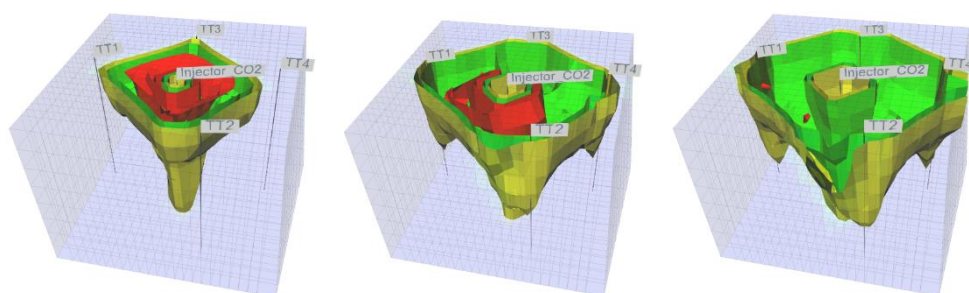
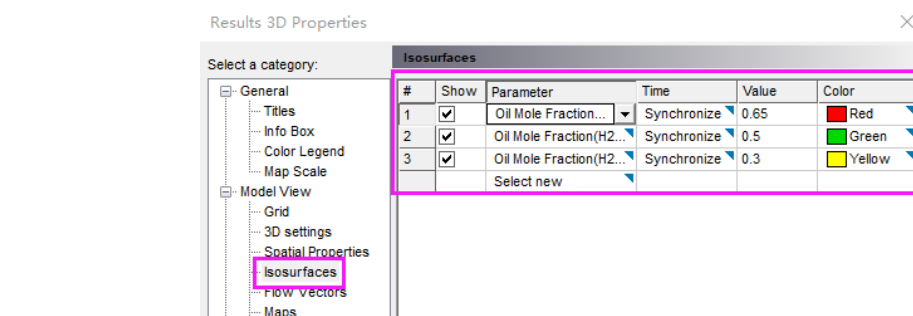
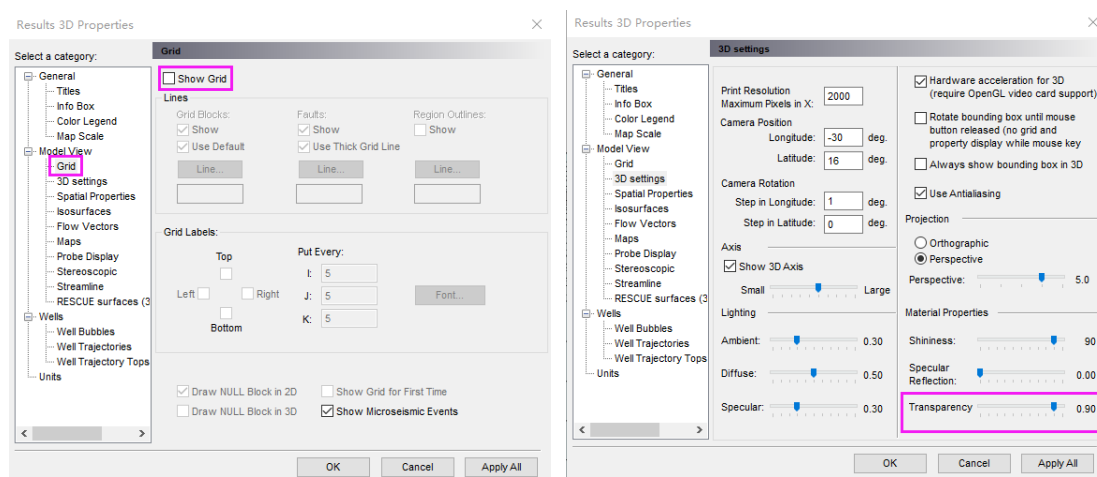
a) 首先选择 **3D** 显示，这里有两个 3D 选项，我们选择 **Legacy** 传统模式；



b) 在主窗口，鼠标**右键** → **properties**，点击 **Grid**，去掉 Show Grid 显示；

c) 点击 **3D setting**，在右下角 **Transparency** 选择合适的透明度 0.9，0 代表完全不透明，1 代表全透明。

d) 设置等值面。点击 **Isosurfaces**，右侧窗口中选择要显示的等值面属性和数值，这里设置了三个取值。



注气 5 年后 注气 10 年后 注气 15 年后

CO₂ 在油相中摩尔分数的等值面图

CO₂ 驱模拟过程中涉及的机理较多—IFT 效应、滞后、CO₂ 在水中的溶解、润湿反转、扩散和弥散、沥青质沉淀等等。在模拟的过程中，不需要同时考虑所有的机理，可以找一个具有代表性的模型来分别模拟，分析每个机理的必要性，然后在模型中加以体现。

5. 三个模拟器模拟 CO₂ 驱的区别

CO₂ 驱油作为一项较为成熟的三采技术，在国内外已经得到了普遍地应用，

同时 CO₂ 作为温室气体，从经济社会健康发展的角度上，CO₂ 埋存也受到越来越多的关注，不管是 CO₂-提高采收率（EOR）和地质封存（CCS），CMG 软件都可以轻松模拟。

对于 CO₂ 驱油的模拟，IMEX、STARS 和 GEM 三个模拟器均可以模拟。不同模拟器的区别都集中于对流体组分的描述和表征上，IMEX 黑油模拟器是使用 PVT 表插值计算，STARS 热采化学驱模拟器使用 K 值（相平衡常数）计算，而 GEM 组分及非常规模拟器是使用 EOS（状态方程）计算，因而有不同的适用性。可通过以下的规则，初步挑选适合的模拟器：

1. 如果 CO₂ 驱过程中可实现混相或非混相，推荐使用 GEM：
 - a) 对于组分的凝析（中间烃组分由气相中凝析到油相）和蒸发（中间烃组分由油相中蒸发到气相），GEM 表征更加精准；
 - b) GEM 可以模拟 CO₂-EOR 和 CO₂-CCS 中的诸多现象，例如 IFT 效应、滞后、CO₂ 在水中的溶解、润湿反转、液态 CO₂ 冷伤害、扩散和弥散、地球化学作用、盖层泄漏等等；
 - c) GEM 是唯一一款能够模拟“LSWI（低矿化度水驱）+混相+泡沫+ASP（三元复合驱）”混合 EOR 过程的数值模拟软件。
2. 如果 CO₂ 驱替是非混相（拟混相）或一次接触混相，也可使用 IMEX；IMEX 优势也很明显，它是三个模拟器中计算速度最快的一个。
3. 如果模拟“CO₂+N₂+蒸汽”开发，需要加上对蒸汽的模拟，使用 STARS。