

水驱、聚驱及凝胶调剖模拟操作全流程（STARS）

2024. 40 版

编写人：吴晓云

凝胶调剖技术是通过化学和物理方法有效封堵高渗透区域的水驱通道，优化注水剖面，从而提高驱油效率，具有广阔的应用前景。利用油藏数值模拟技术可以优化凝胶开发方案，降低风险，提高油藏采收率。

CMG 的 STARS 模拟器通过结合凝胶反应动力学、聚合物吸附、渗透率降低以及凝胶的物理化学性质，全面模拟凝胶调剖过程，主要机理如下：

凝胶形成动力学

STARS 模拟器应用阿尔纽斯动力学方程，允许用户自定义化学反应动力学模型。凝胶的形成速率与聚合物浓度和交联剂浓度密切相关，通过调整反应参数精确控制凝胶的形成过程。此外，模拟器可以根据需求实现聚合物和凝胶的降解过程。

凝胶吸附与渗透率降低

凝胶在油藏岩石表面的吸附对凝胶调剖效果具有重要影响。STARS 模拟器采用 Langmuir 等温线来描述这种吸附行为。凝胶的吸附将导致油藏渗透率降低，并通过残余阻力因子（RRFT）进行量化。

凝胶的物理化学性质

凝胶的物理化学性质，特别是其粘弹性和扩散特性，决定了其在油藏中的分布和渗透效果。STARS 模拟器能够表征凝胶剂的非线性粘度混合规则，模拟凝胶在不同条件下的流变行为，可以更好地预测其在油藏中的迁移和分布，优化调剖效果。

通过上述机理的模拟，STARS 模拟器能够全面地表征凝胶调剖过程中的各种物理化学现象，为凝胶调剖技术的优化和应用提供了有力的工具。

本文使用 SPE14234 提供的数据，系统地介绍了从创建水驱模型，到创建聚驱、凝胶模型的过程，由简到繁，逐步深入，便于初学者进行系统学习。

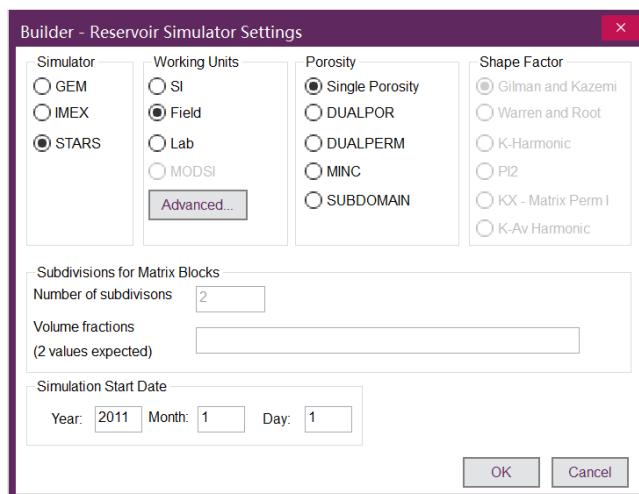
目 录

编写人：吴晓云.....	1
一、水驱模型	3
二、聚驱模型	23
三、凝胶模型	30

一、水驱模型

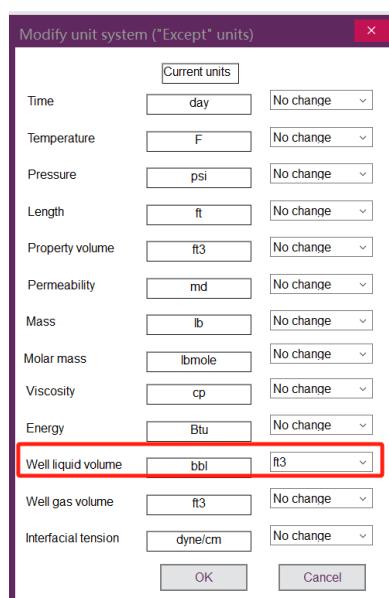
开启 Builder

1. 双击启动器（Launcher）中的相应图标打开 Builder。
2. 进入 File→New，选择以下选项：
 - STARS Simulator
 - Field Units
 - 设置起始日期为 2011-01-01



3. 更改体积单位：

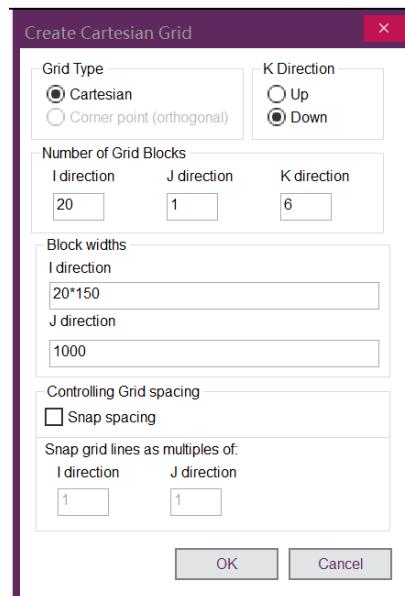
- 点击上面窗口工作单位制中的“高级”（Advanced）按钮，将液相体积单位从桶（bbl）更改为立方英尺（ft3）。
- 点击 OK（确认）两次接受所选选项。



创建网格

4. 创建网格：

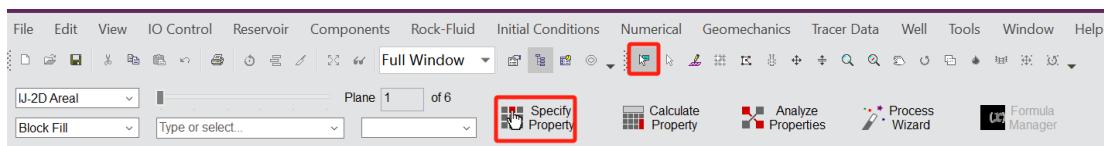
- 点击 Reservoir→Create Grid→Cartesian，然后输入以下信息：
 - X 方向：20 个网格，每个网格 150 英尺。
 - Y 方向：1 个网格，1000 英尺。
 - Z 方向：6 层。



赋值网格属性

5. 切换到探针模式：

- 切换到探针模式，然后点击定义属性 Specify Property。



6. 输入属性值：

- 网格顶部 (Grid Top)：第 1 层输入 0。
- 网格厚度 (Grid Thickness)：
 - 第 1 至第 4 层：20 英尺。
 - 最后 2 层：10 英尺。
- 孔隙度 (Porosity)：
 - 第 1 至第 4 层：0.20。

- 最后 2 层: 0.25。

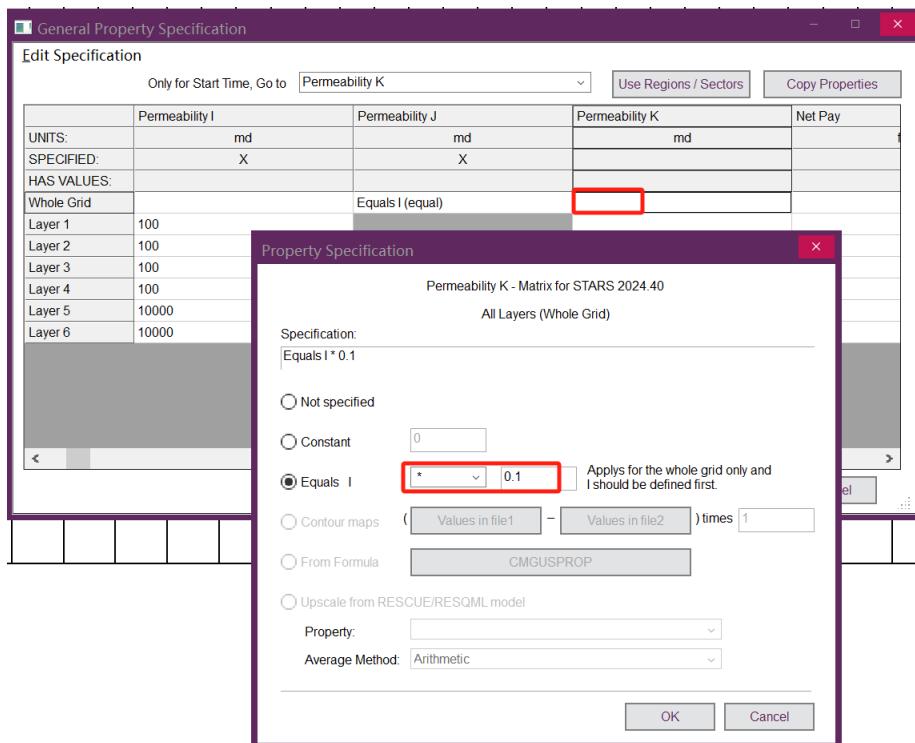
7. 设置渗透率:

- 选择“渗透率 I”(Permeability I) 并输入以下值:

- 第 1 层: 100
- 第 2 层: 100
- 第 3 层: 100
- 第 4 层: 100
- 第 5 层: 10000
- 第 6 层: 10000

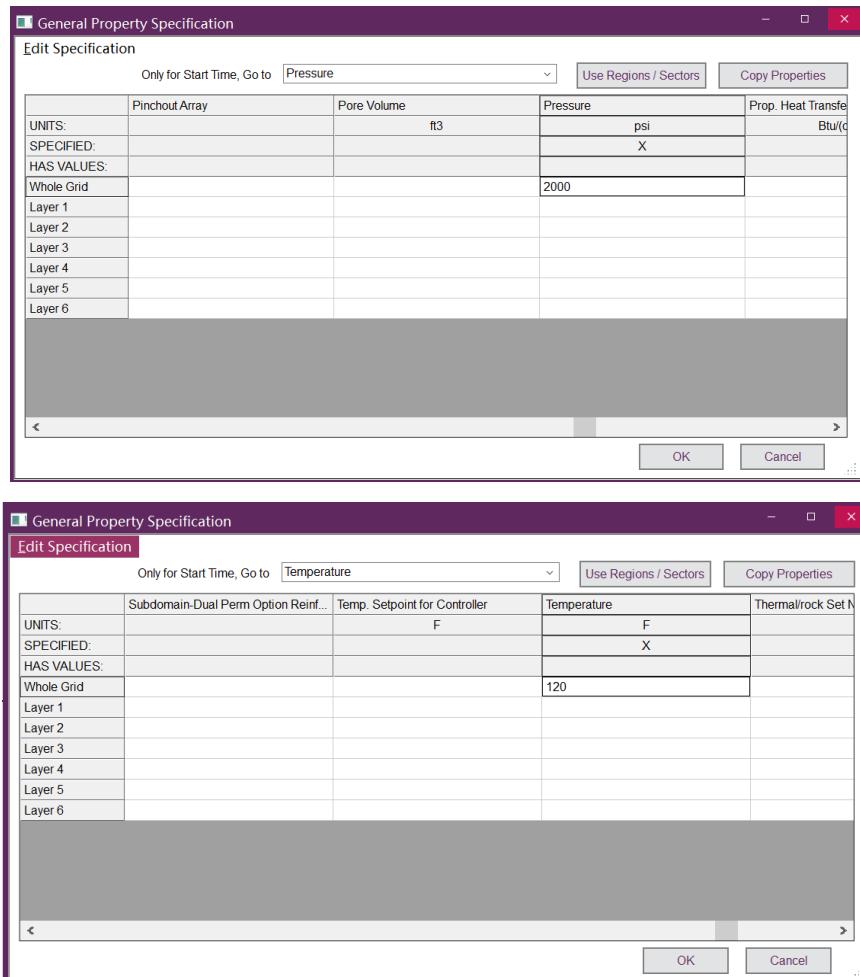
8. 设置渗透率 J 和 K:

- 选择“渗透率 J”(Permeability J)，右键点击“整个网格”(Whole Grid) 框，选择“等于 I”(EQUALSI) 然后点击 OK。
- 对“渗透率 K”(Permeability K) 重复上述步骤，设置 Kv/Kh 比为 0.1。



9. 设置压力和温度:

- 选择“压力”(Pressure) 并输入 2000 psi。
- 选择“温度”(Temperature) 并输入 120° F。

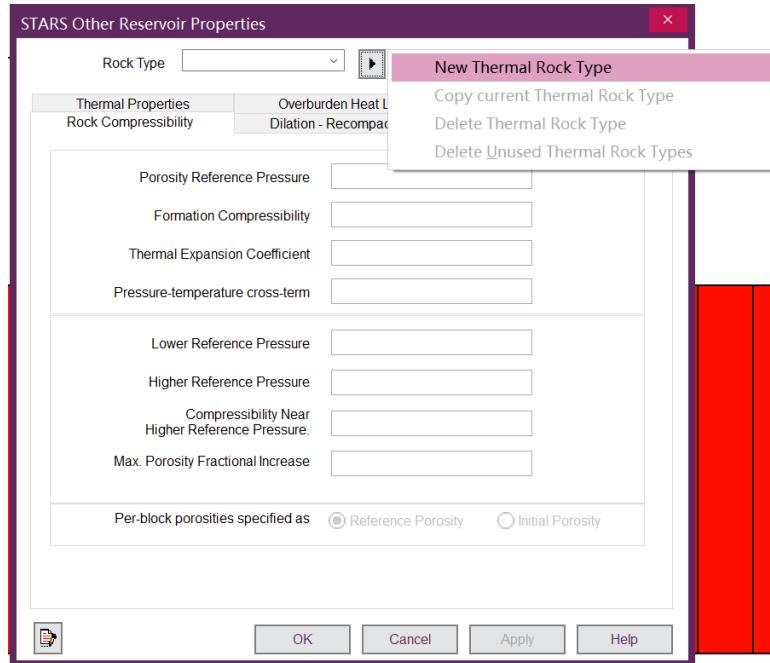


10. 确认属性：

- 在属性定义窗口点击 OK (确认)，然后在“网格/角点赋值计算”(Block/Corner Value Calculation) 窗口再次点击 OK。
- 这个窗口也可以通过点击顶部的“计算属性”(Calculate Property) 按钮访问。

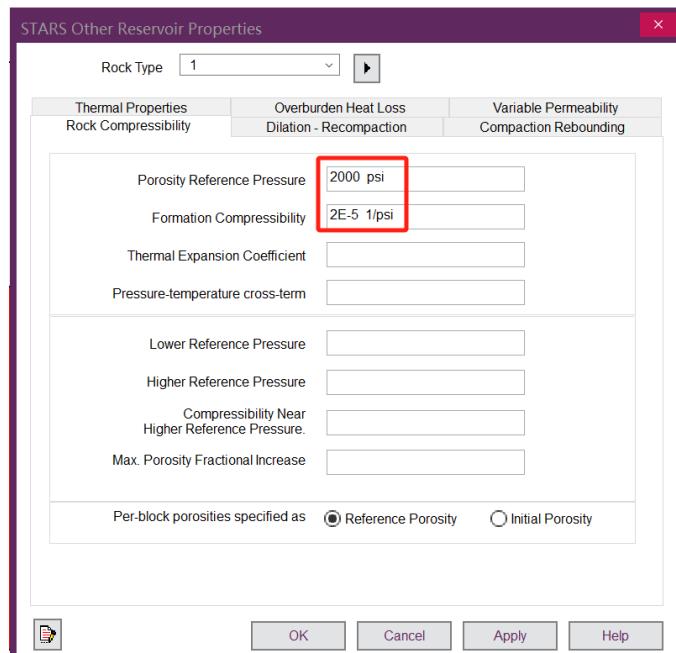
11. 创建热岩石类型：

- 在树视图的“储层”(Reservoir) 部分，双击“热岩石类型”(Thermal Rocktypes) 打开相关窗口。
- 点击顶部的三角形图标，选择“新建热岩类型”(New Thermal Rock Type)。



12. 设置岩石压缩系数：

- 在“岩石压缩系数”（Rock Compressibility）标签下，输入孔隙参考压力 (PRPOR) 为“2000” psi 和地层压缩系数为“2E-5” 1/psi。
- 单位将自动应用。点击 Apply（应用）和 OK（确认）。



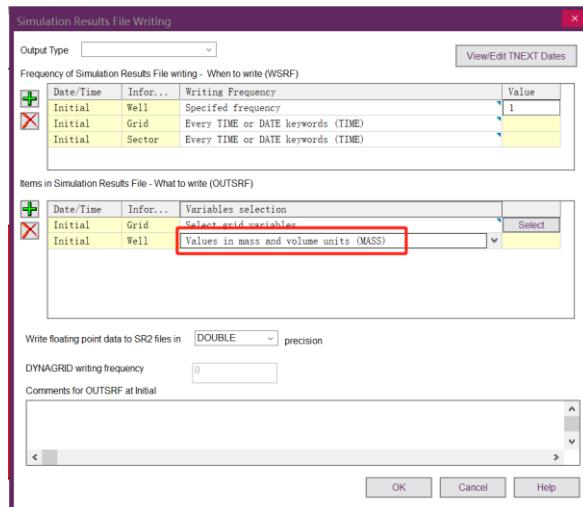
13. 保存数据文件：

- 点击菜单栏 File → Save As，将数据文件保存为 WaterFlood.dat。

设置输出参数

14. 设置输出：

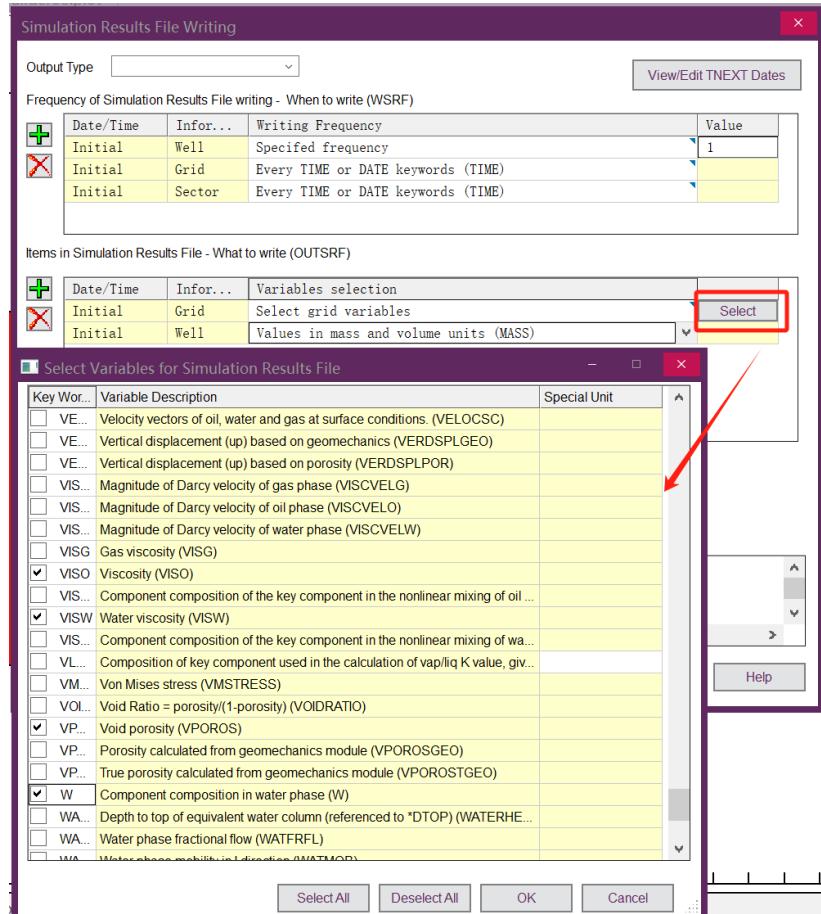
- 进入 I/O 控制(I/O Control), 双击“模拟结果输出”(Simulation Results Output)。
- 在 OUTSRF 部分，修改井的输出，选择为“质量与体积单位 (MASS)”(Values in mass and volume units (MASS))。



15. 选择网格参数：

- 点击选择 GRID 后侧的按钮 (Select)，然后选择以下参数，之后点击 OK 退出：
 - 流体孔隙度 (Fluid Porosity, FPOROS)
 - 油相相对渗透率 (Oil relative permeability, KRO)
 - 水相相对渗透率 (Water relative permeability, KRW)
 - 油相密度 (Oil Density, MASDENO)
 - 水相密度 (Water Density, MASDENW)
 - 压力 (Pressure, PRES)
 - 油相阻力因子 (Oil phase resistance factor, RFO)
 - 水相阻力因子 (Water phase resistance factor, RFW)
 - 气相饱和度 (Gas Saturation, SG)
 - 油相饱和度 (Oil Saturation, SO)
 - 水相饱和度 (Water Saturation, SW)

- 温度 (Temperature, TEMP)
- 油相粘度 (Oil viscosity, VISO)
- 水相粘度 (Water viscosity, VISW)
- 总孔隙度 (Void Porosity, VPOROS)
- 水相组成 (Composition in water phase, W)



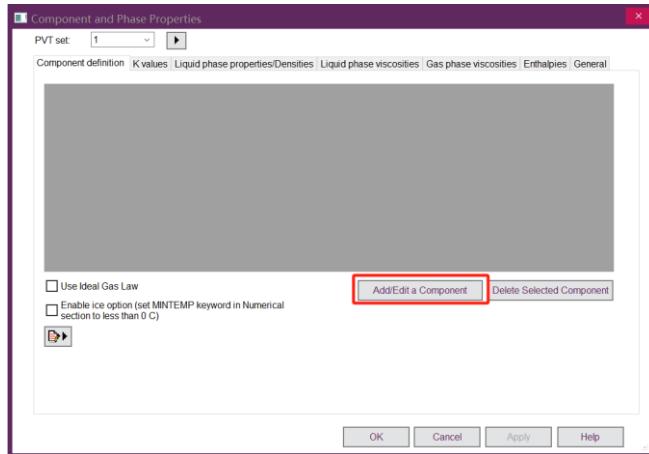
创建 PVT 数据

16. 选择组标签:

- 在菜单栏中选择“组分”(Components)标签，点击 Add/Edit a Component。

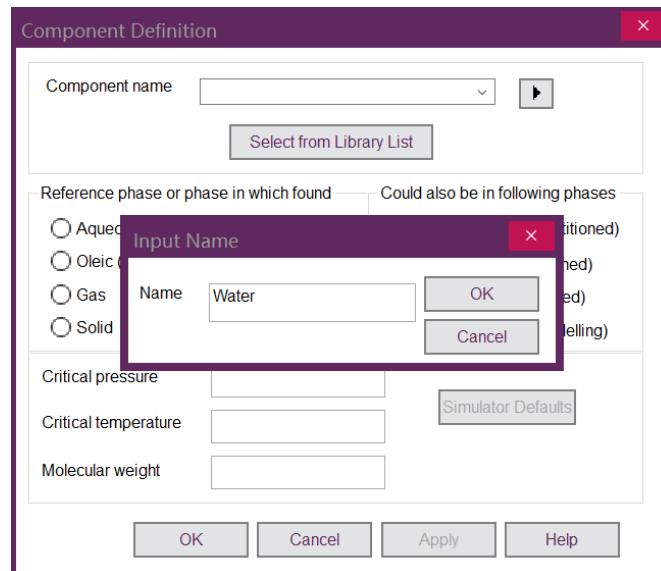
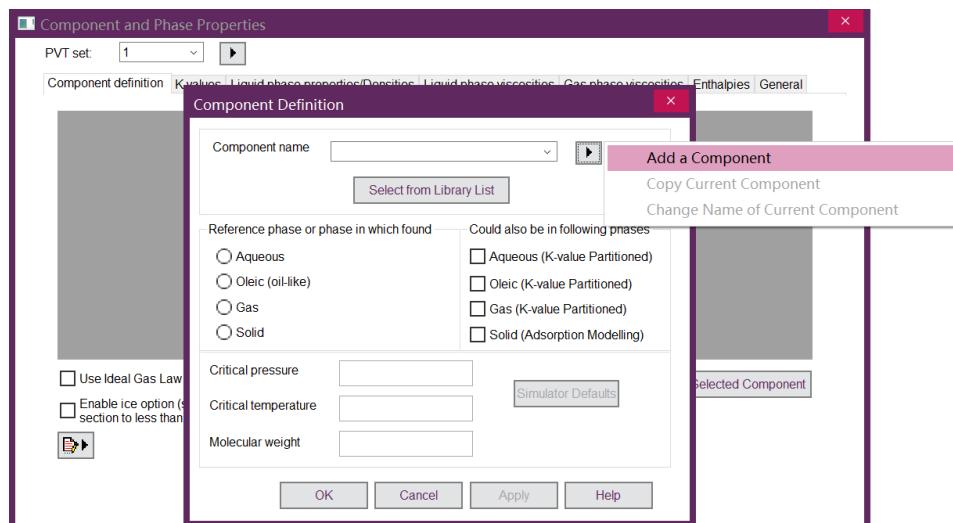
17. 添加/编辑组分:

- 在组分和相属性窗口(Component and Phase Properties)中，点击“添加/编辑组分”(Add/Edit a Component)按钮。



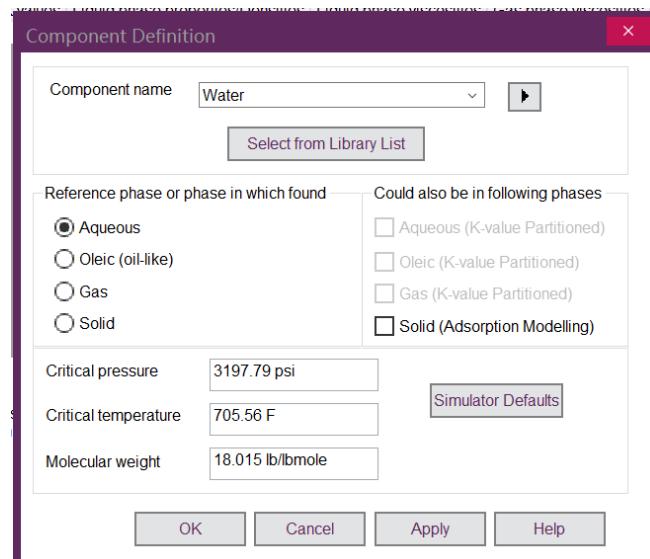
18. 定义组分：

- 在组分定义窗口（Component Definition Window）中，点击“添加组分”（Add a Component）按钮，输入“水”（Water）作为组分名称。



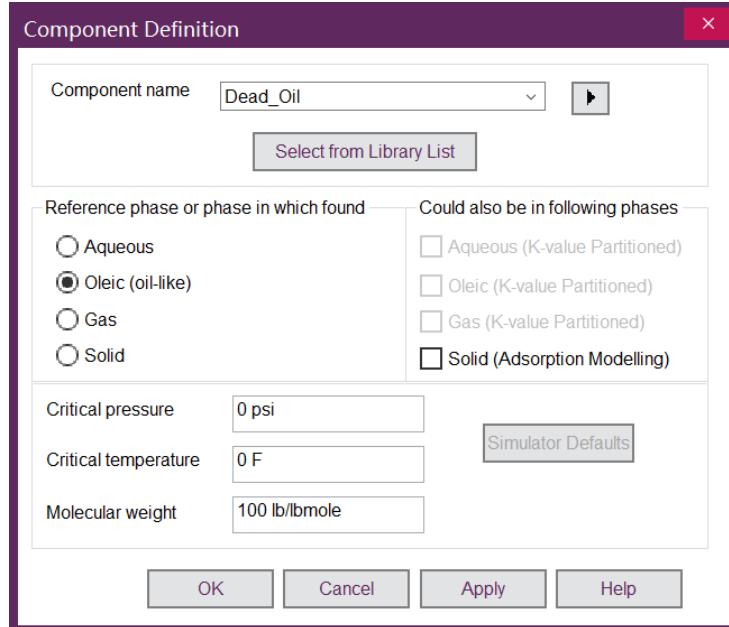
19. 设置参考相：

- 确保参考相（Reference Phase）设置为“水相”（Aqueous）。
- 输入临界压力（Critical Pressure）： $3197.79 \text{ psi} = 2.207 \times 10^7 \text{ Pa}$
- 输入临界温度（Critical Temperature）： $705.56^\circ \text{ F} = 370.87^\circ \text{ C} = 643.02 \text{ K}$
- 输入分子量（Molecular Weight）： $18.015 \text{ lb/lbmol} = 8.0135 \text{ kg/kgmol}$



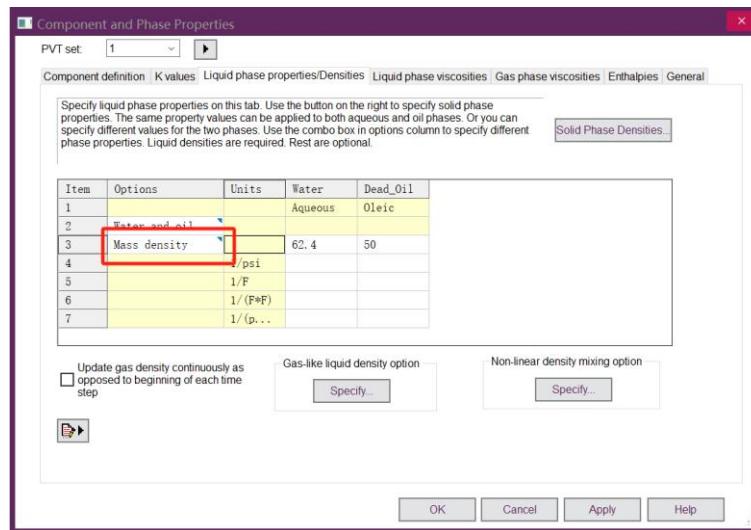
20. 添加死油组分：

- 重复之前的步骤，添加“死油”（Dead_Oil）作为新组分，设置参考相为“油相”（Oleic），临界温度和压力设置为 0.0，分子量设置为 $100 \text{ lb/lbmol} = 45.3592 \text{ kg/kgmol}$ 。
- 完成后点击 Apply（应用）然后点击 OK（确认）。



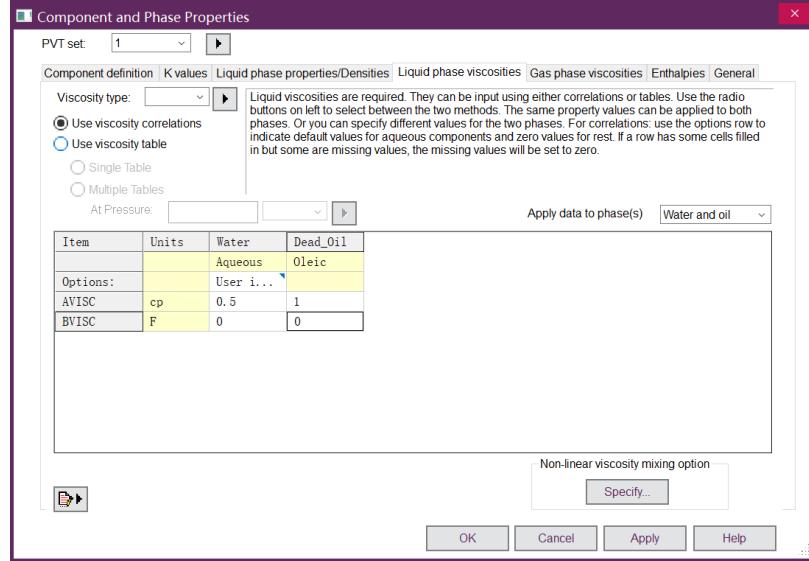
21. 设置密度：

- 点击“密度”(Densities)标签，将“摩尔密度”(Molar Density)框更改为显示“质量密度”(Mass Density)，并输入水的密度为 $62.4 \text{ lb/ft}^3 = 1005.22 \text{ kg/m}^3$ ，死油的密度为 $50 \text{ lb/ft}^3 = 801.63 \text{ kg/m}^3$ ，然后点击 Apply (应用) 按钮。



22. 设置粘度：

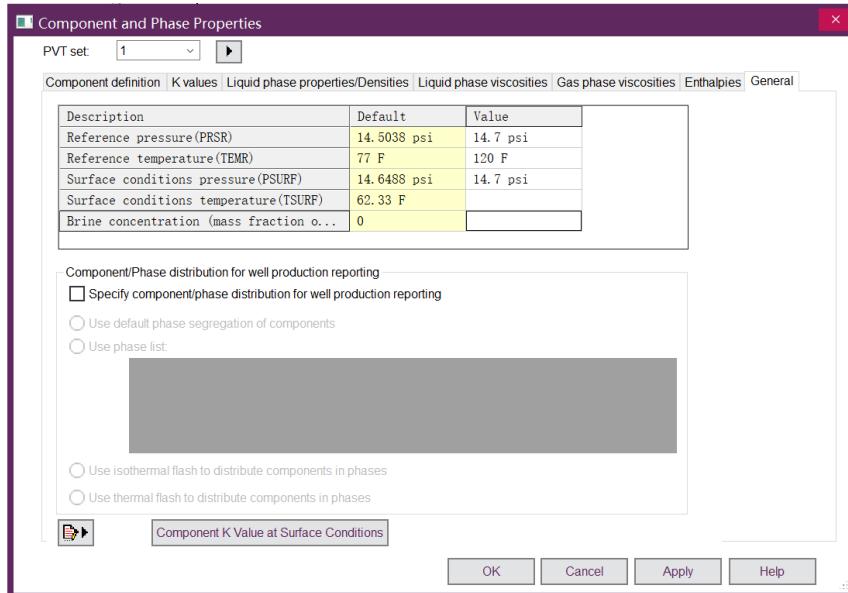
- 在“液相粘度”(Liquid phase viscosity)标签中，输入相应的值。



- 完成后点击 Apply (应用)。此时，组分部分 (Components section) 应该出现一个绿色的勾选标记。

23. 输入参考和表面属性：

- 在“常规” (General) 标签中，输入参考和地面条件。



- 完成后点击 Apply (应用)，然后点击 OK (确认)。

创建相对渗透率曲线

24. 选择岩石流体标签：

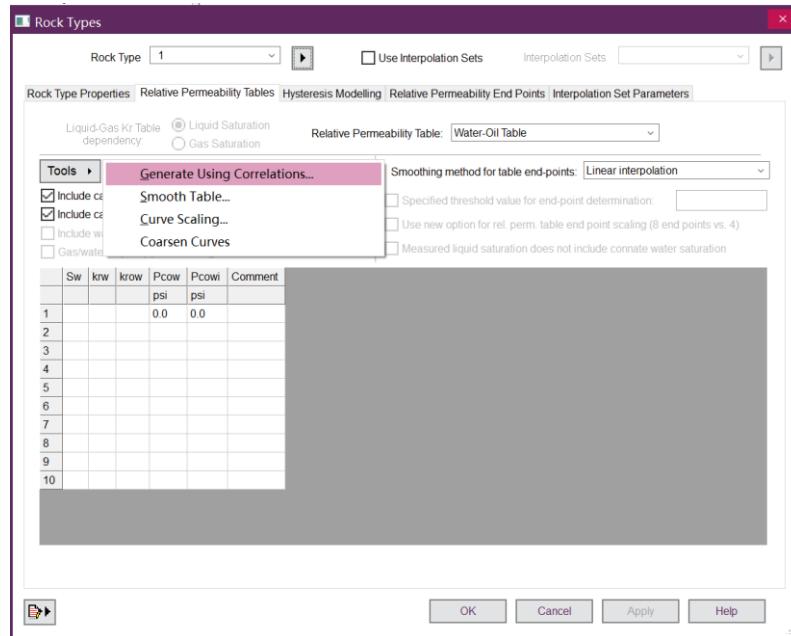
- 在树视图 (Tree View) 中选择“岩石流体” (Rock Fluid) 标签，然后双击“岩石流体类型” (Rock Fluid Types)。

25. 新建岩石类型：

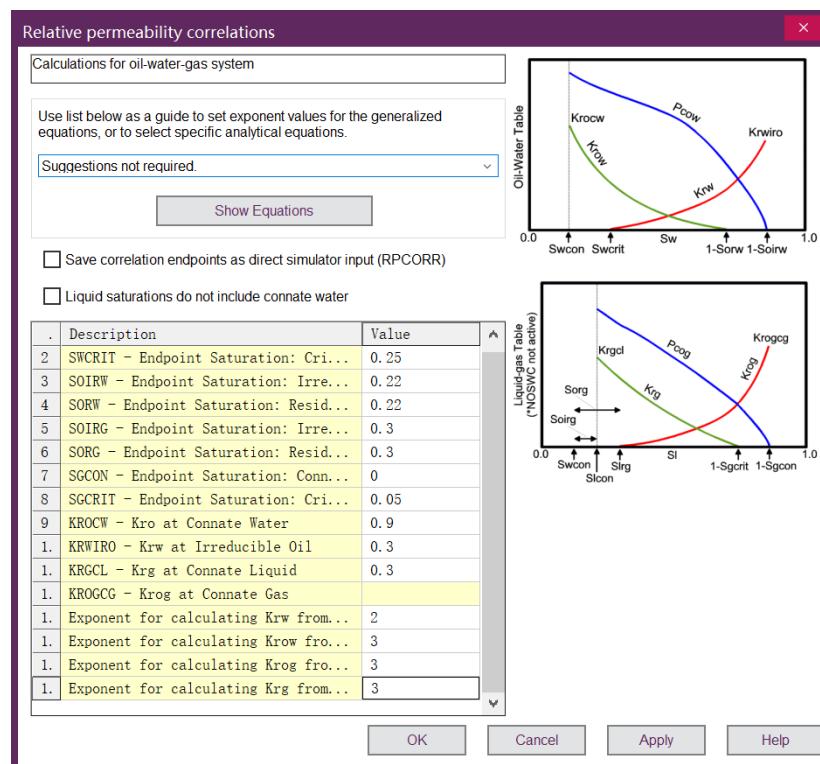
- 点击按钮，然后选择“新建岩石类型”（New Rock Type）。

26. 生成表格：

- 点击 Tools (工具) 按钮，然后选择“使用相关性生成表格”（Generate tables using Correlations）。

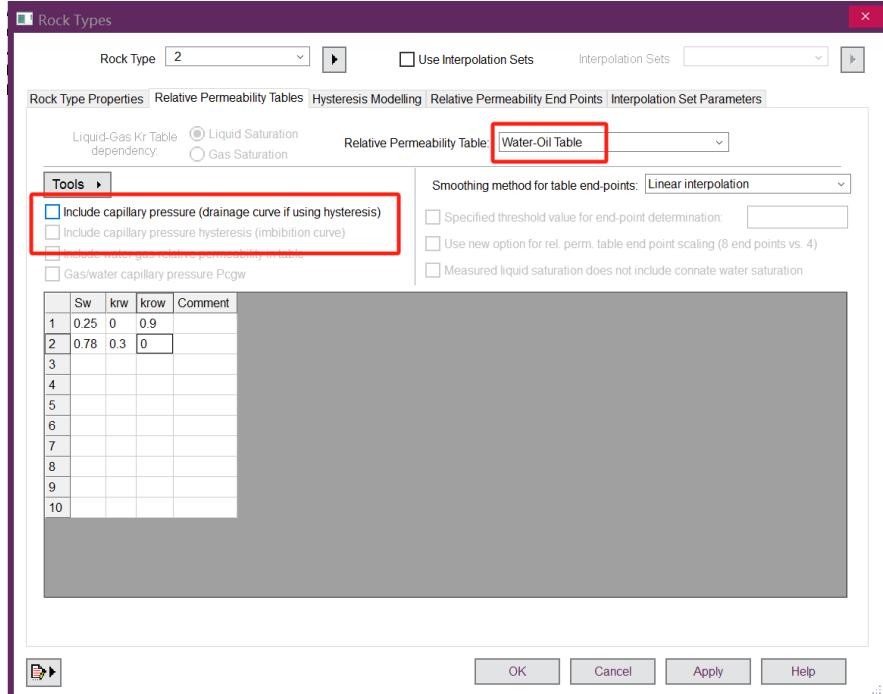


- 输入表中的值，然后点击 Apply (应用) 和 OK。

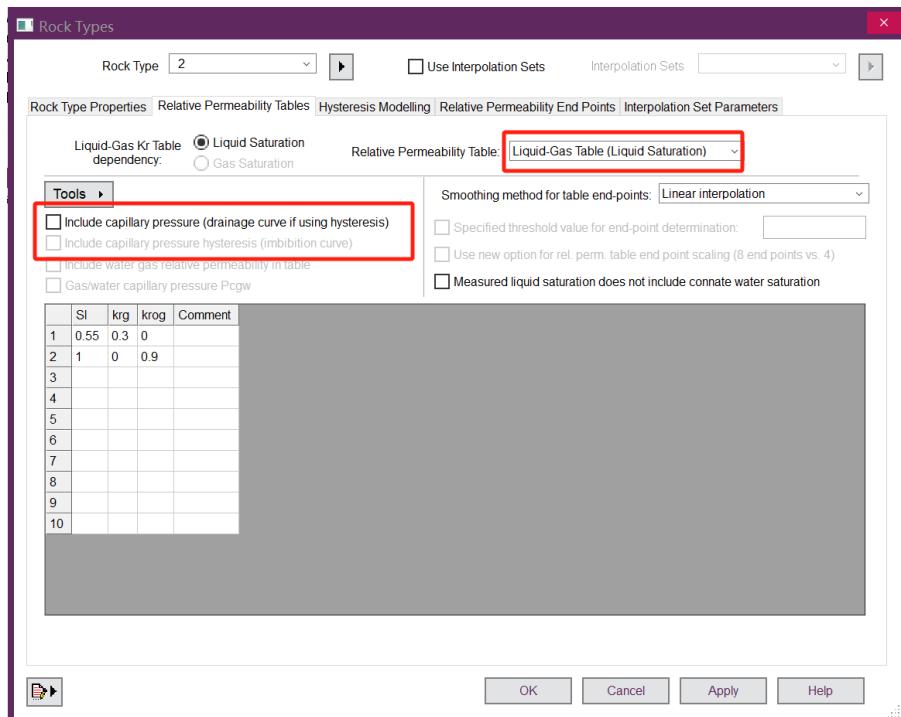


27. 设置第二套相对渗透率表：

- 点击按钮，然后选择“新建岩石类型”（New Rock Type）。
- 输入表中的值。



- 切换“相对渗透率表”为“油-气表”（Liquid-Gas Table），并输入相应的值。

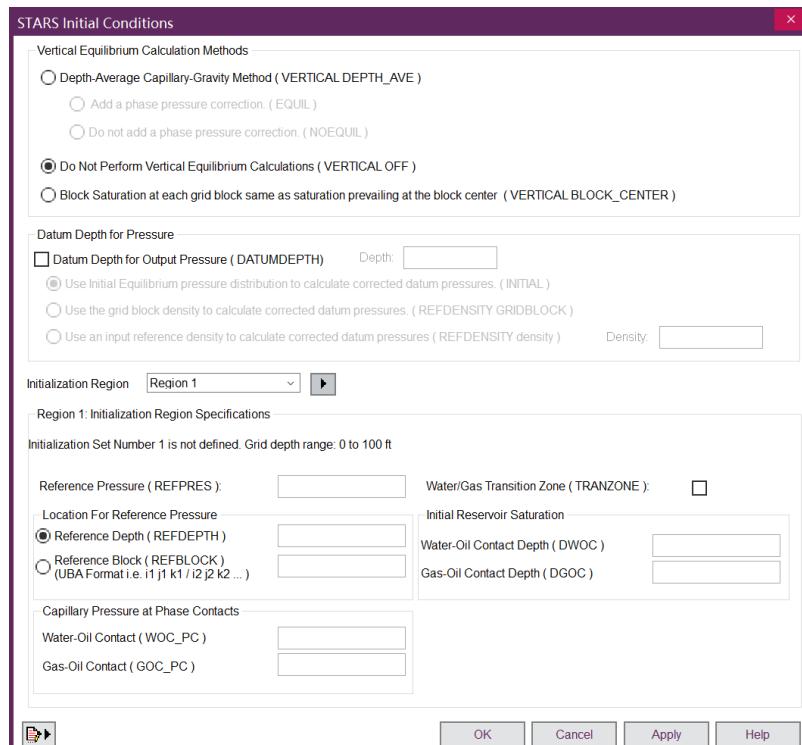


28. 确认更改：

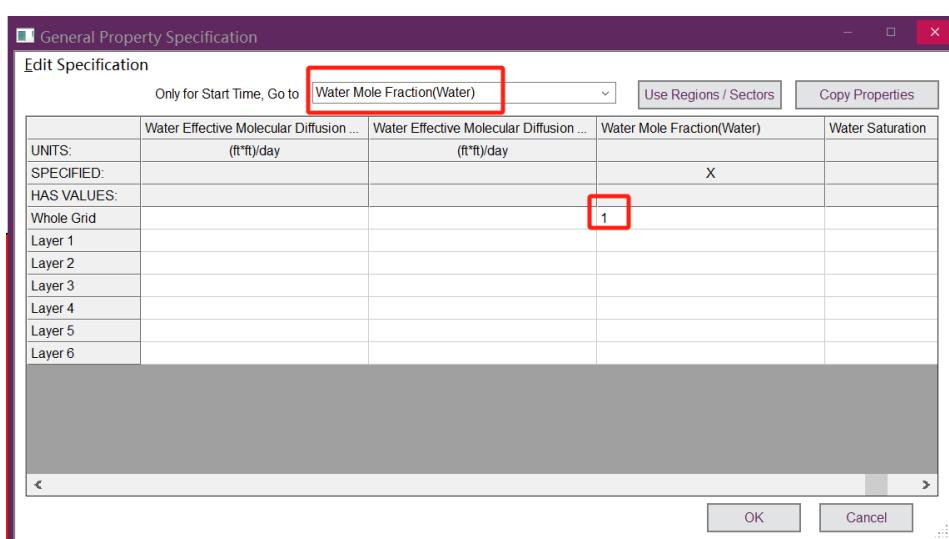
- 点击 OK (确认) 接受所有的更改。

初始化

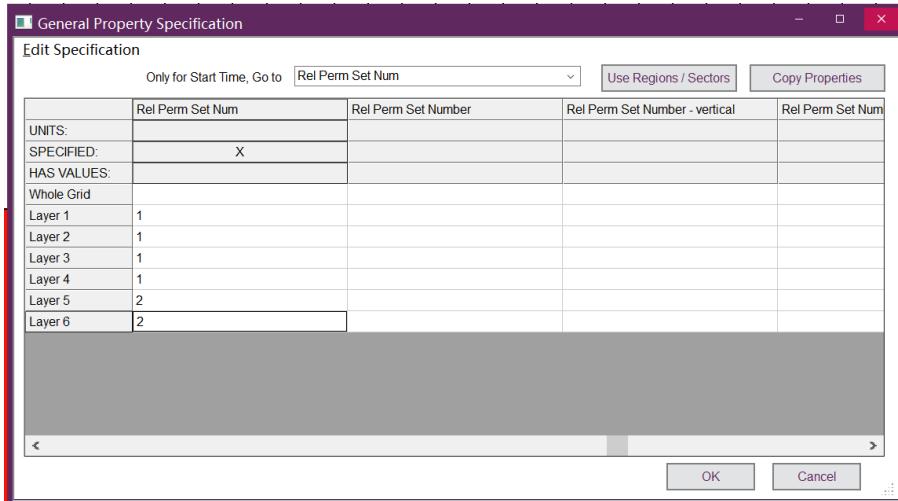
29. 点击树形视图中的 Initial Conditions 标签，双击 Initial Conditions，然后选择“不执行垂直平衡计算（VERTICAL OFF）”。点击 Apply，然后 OK。初始条件部分应出现绿色勾选标记。



30. 点击 Specify Property，找到“Water Mole Fraction (Water)”属性，输入常数值 1.0。



26. “Rel Perm Set Number” 属性，第 1 至 4 层（低渗透率）赋值为 1，第 5 至 6 层赋值 2。点击两次 OK。

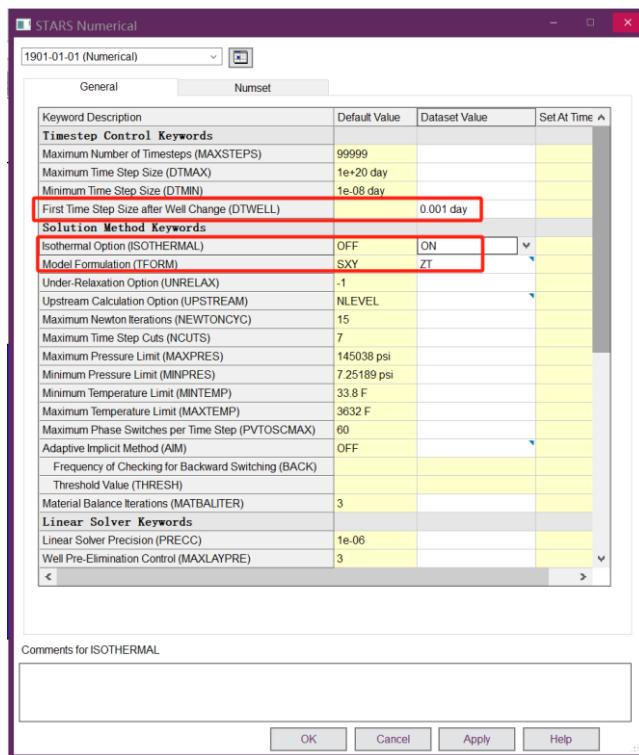


数控部分

27. 点击 Numerical 标签，然后双击 Numerical Controls 打开数值窗口。

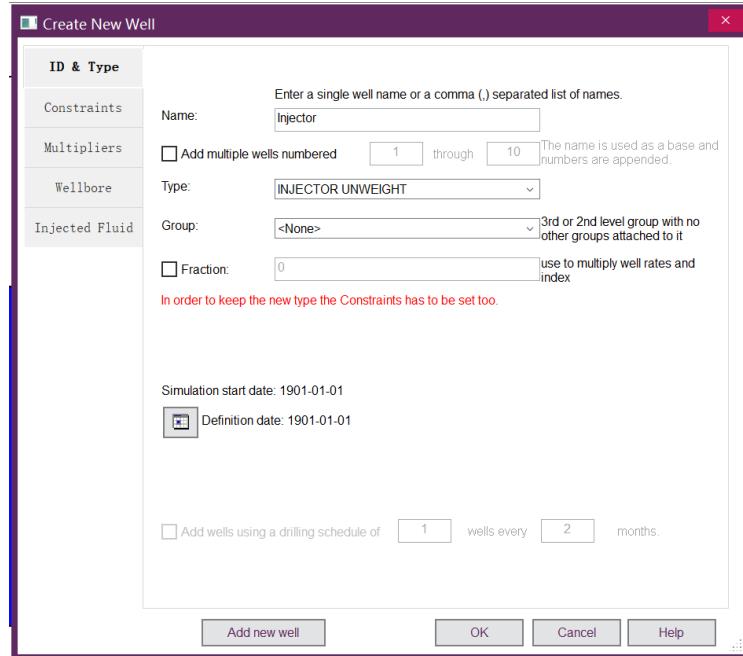
输入以下值：

- 井变更后的第一个时间步长 (DTWELL) 0.001
- 等温选项 (ISOTHERMAL) ON
- 模型调制 (TFORM) ZT
- 点击 Apply 然后 OK。数值部分应出现绿色勾选标记。保存数据文件。

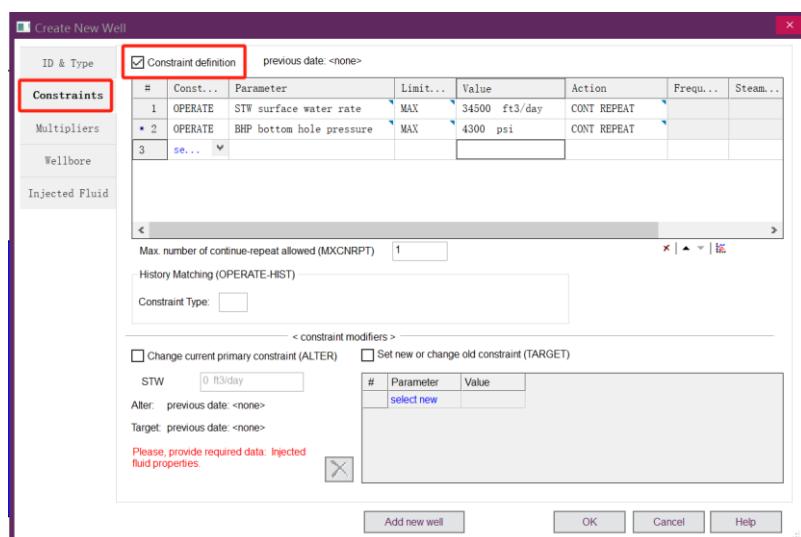


井定义

28. 点击 Wells & Recurrent 标签，在树形视图中右键点击 Wells，选择 New。在 Name 中输入“Injector”，勾选 Type 的编辑框，选择 INJECTOR UNWEIGHT。

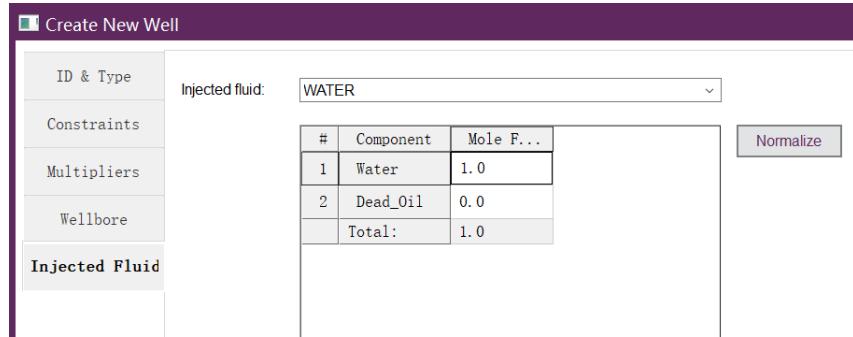


29. 切换到“Constraints”标签（如果提示应用更改，请点击 YES），勾选约束定义框。
30. 在约束列的表格中选择“OPERATE”，选择 STW, MAX, 34500 ft³/day, CONT REPEAT。
31. 重复上述步骤，添加 BHP, MAX, 4300 psi, CONT REPEAT。

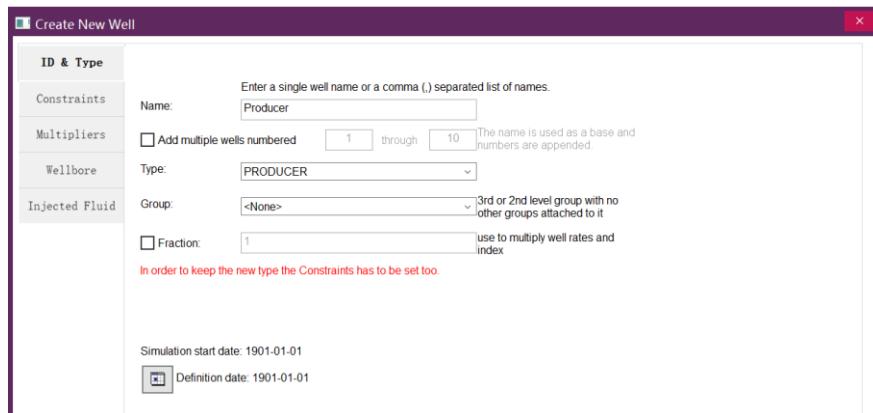


32. 转到“Injected Fluid”标签，选择水作为注入流体。在注入流体下，输

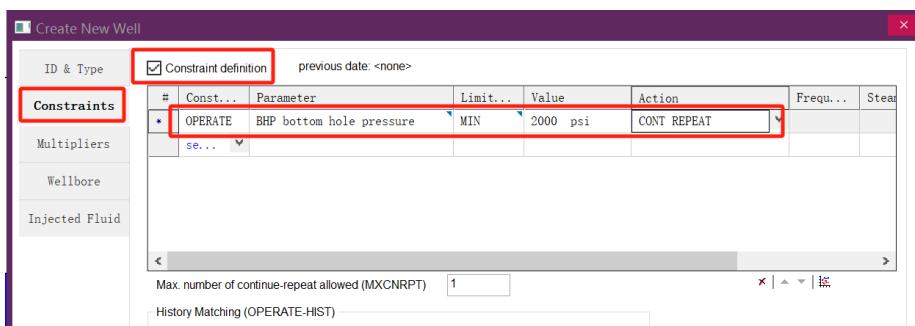
入水的摩尔分数为 1.0。点击 OK。



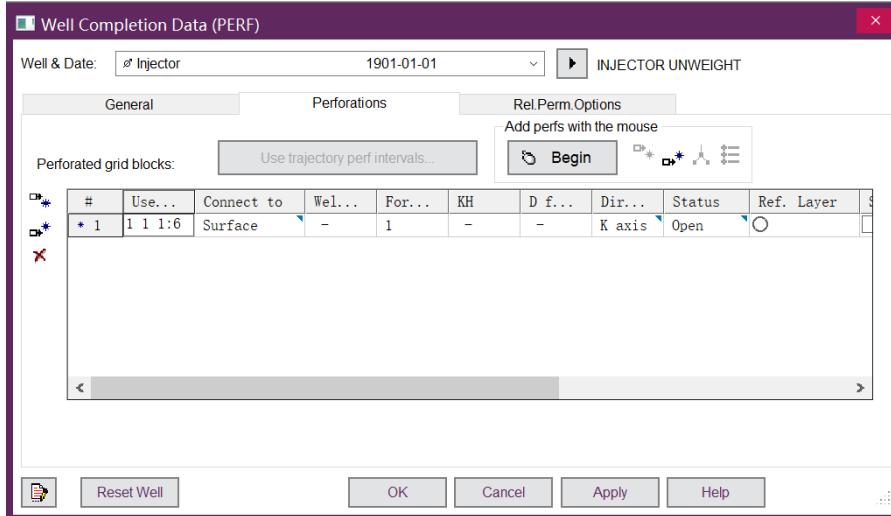
33. 在 Wells & Recurrent 标签中，右键点击 Wells 添加 New，在 Name 中输入“Producer”。Type 选择 PRODUCER。



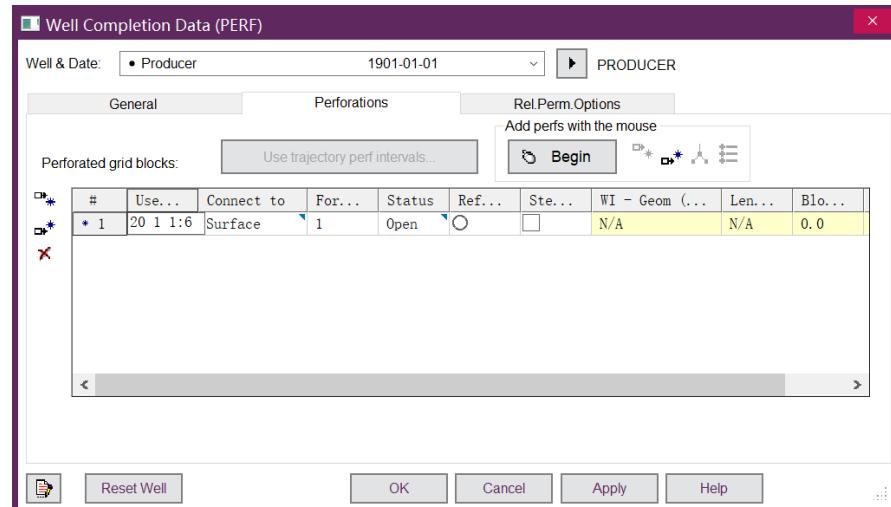
34. 在 Constraints 标签下，添加 OPERATE BHP MIN 2000 psi CONT REPEAT。点击 OK 确认所有更改。



35. 点击菜单栏“Wells & Recurrent”部分，选择 Well Completions (PERF) 选项。在 Perforations 标签下，注入井，输入 1 1 1:6，然后点击 Apply。



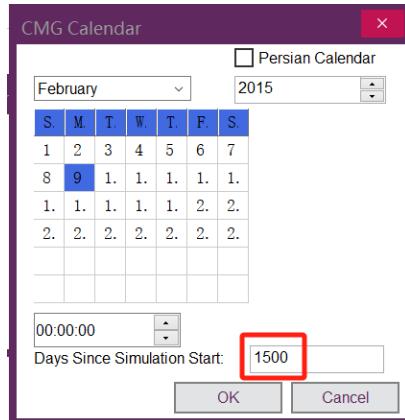
36. 点击顶部的下拉菜单，切换到生产井，重复上述步骤。生产井，输入 20 1 1:6，然后点击 Apply 和 OK。



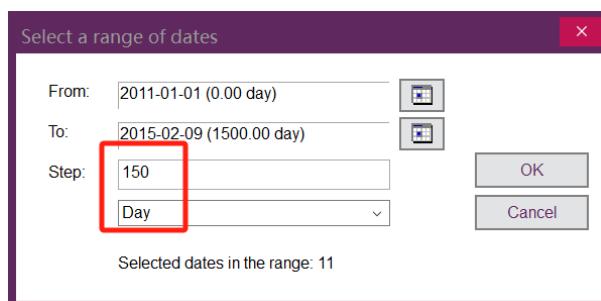
37. 最后，添加一系列日期，开发方式如下：

- 0 至 450 天：水驱
- 450 至 600 天：聚合物/凝胶
- 600 至 1500 天：水驱

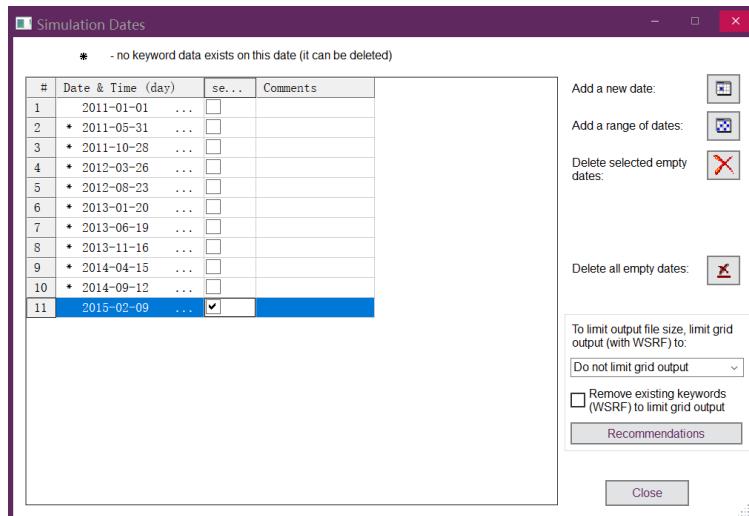
38. 在“Wells & Recurrent”下，双击“Dates”。在“Simulation Dates”窗口中，点击“Add a range of Dates”按钮。
39. 保持“From”部分不更改，点击“To”部分旁边的日历小按钮。在 CMG 日历窗口中，输入 1500 到“Days Since Simulation Start”框中，然后点击“OK”。



40. 将步长改为 150 天，点击“OK”，应新增 10 个日期。

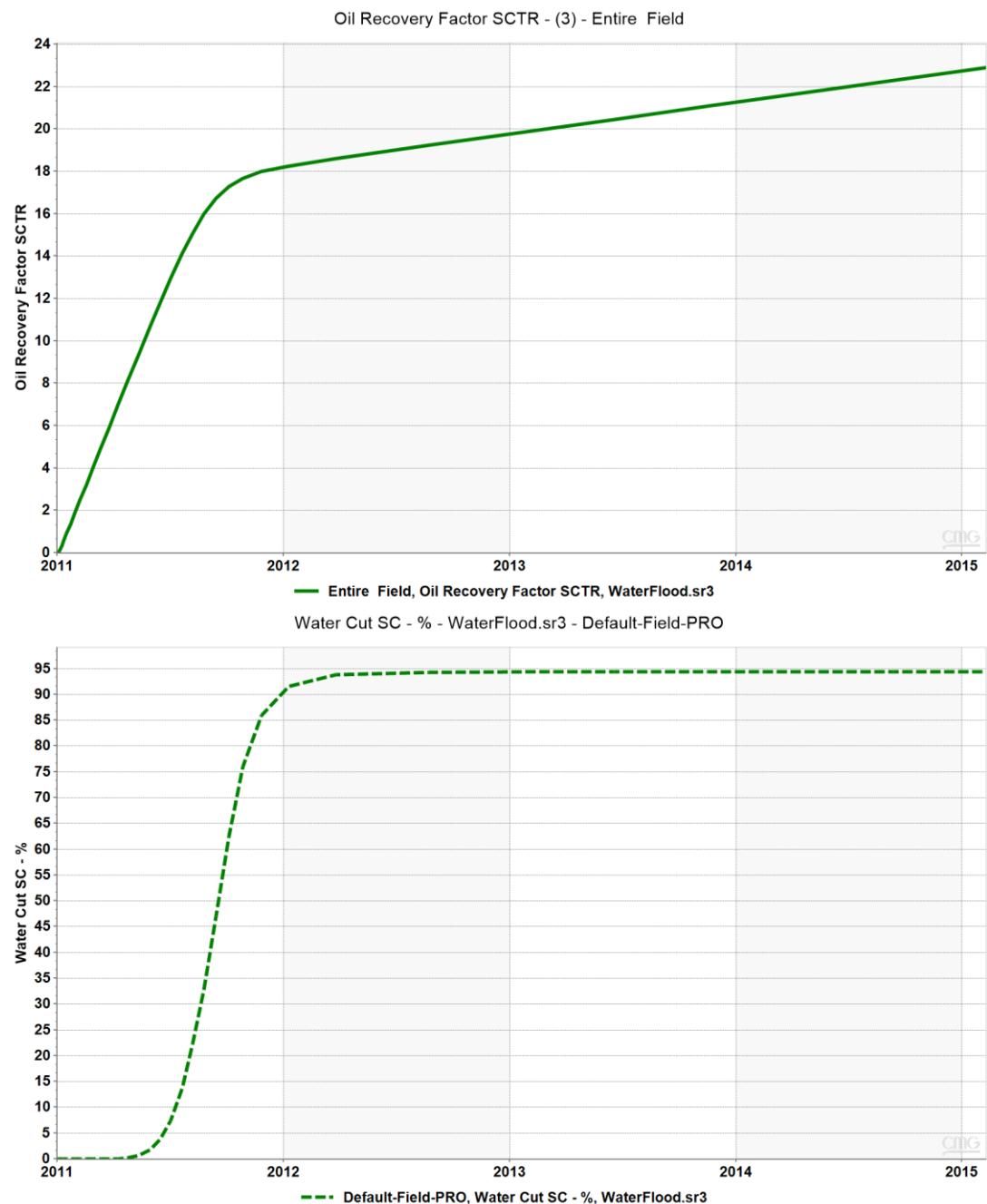


41. 在日期末尾设置 STOP 关键字，关闭窗口，保存数据文件。



查看模拟结果

42. 在 Launcher 窗口将该文件拖至 STARS 图标，运行该模型。将 SR3 文件拖至 Results 图标，并绘制采收率以及含水率曲线，可与后续的模型进行对比展示。

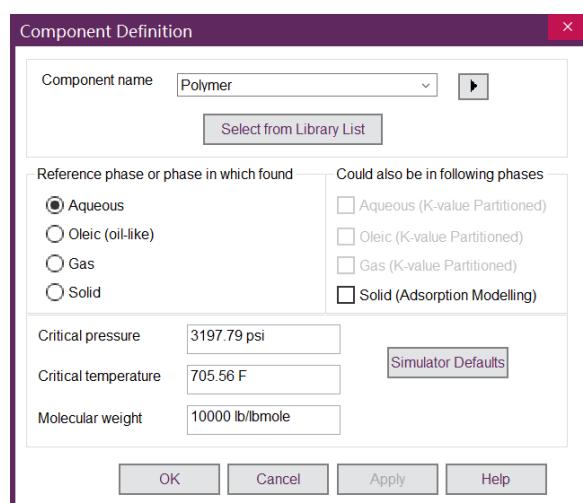


二、聚驱模型

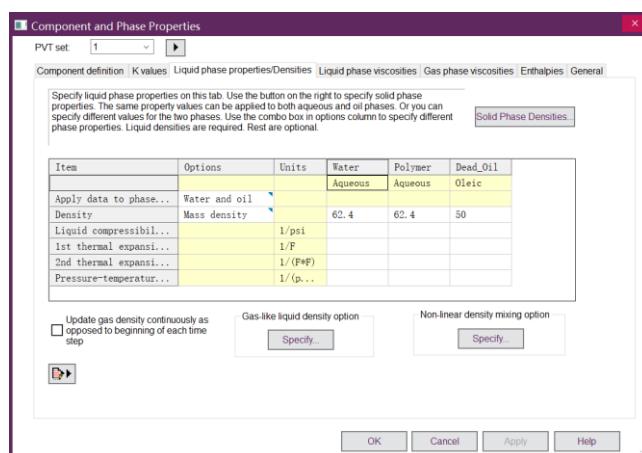
在水驱基础上，通过添加组分及相应机理进行聚驱模拟。

聚合物组分及属性添加

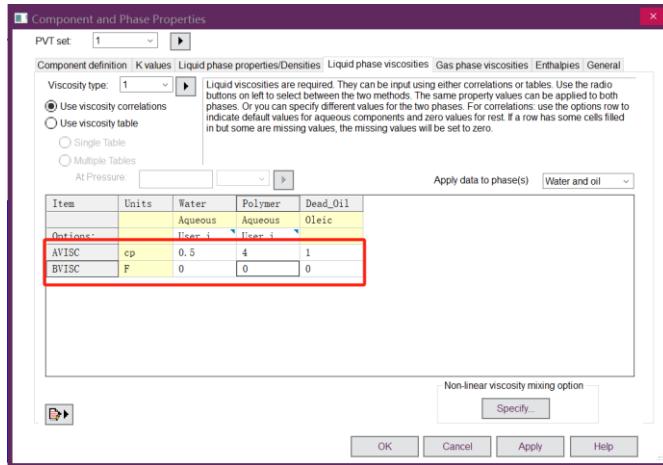
1. 在 Builder 中打开 “WaterFlood.dat” 文件。
2. 点击菜单栏 “Components” ，选择 “Add/Edit Components” 。在 “Component and Phase Properties” 窗口出现后，点击 “Add/Edit a Component” 按钮。
3. 点击组分旁边的箭头按钮，选择 “Add a Component” ，将新组分命名为 “Polymer” ，并将参考相设为 “Aqueous” ，输入以下属性：
 - 临界压力: 3197.79 psi
 - 临界温度: 705.56 ° F
 - 分子量: 10000 lb/lbmole



4. 在 “Densities” 标签页，为聚合物输入质量密度 62.4 lb/ft³。

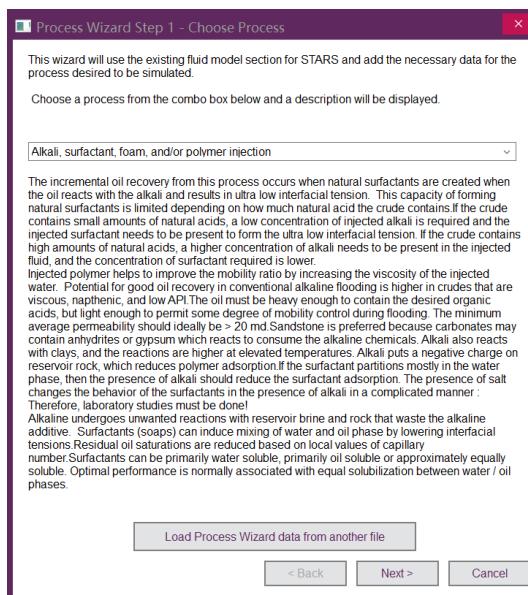


5. 在“Liquid phase viscosity”标签页，根据 SPE 14234 文献中 Biopolymer (Model Xanthan) 案例，输入聚合物的粘度值 4 cp。



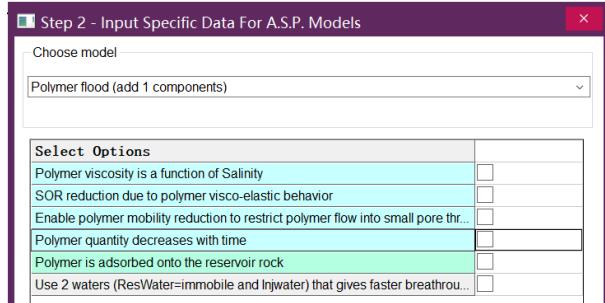
使用向导进行化学驱模拟

6. 完成聚合物的基础数据文件后，可以使用“Process Wizard”完成后面的步骤。先将文件另存为“PolymerFlood.dat”。
7. 点击菜单栏“Components” → “Process Wizard...”。从下拉菜单中选择“Alkaline, Surfactant, foam, and/or Polymer injection”，会出现有关所选开发过程的信息，点击“Next”。

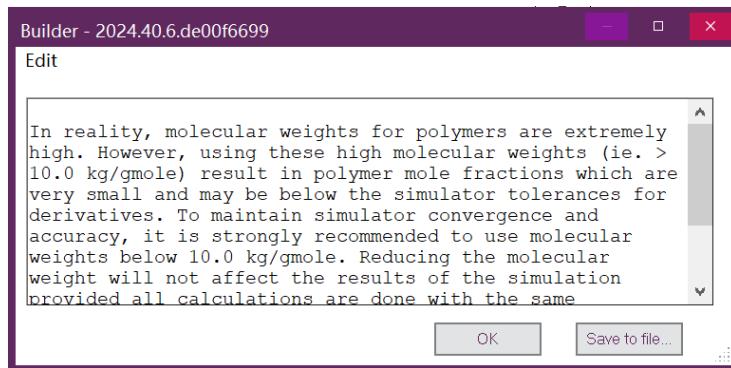


8. 在“Chose Model”下拉框中选择“Polymer flood(add 1 components)”。选择此选项后，此过程的不同参数会使用默认值，但根据文献表 2 信息，需要取消勾选“Polymer is adsorbed onto the reservoir rock”和

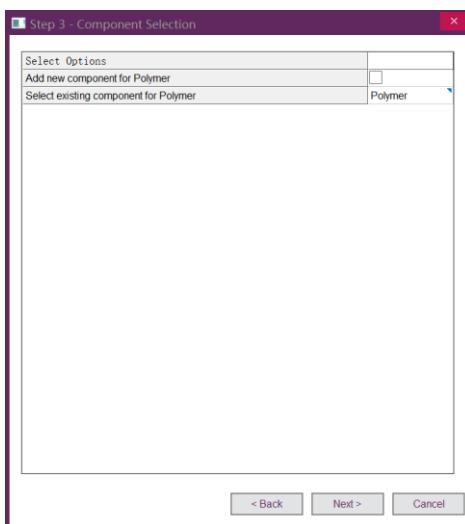
“Polymer quantity decreases with time”，点击“Next”。



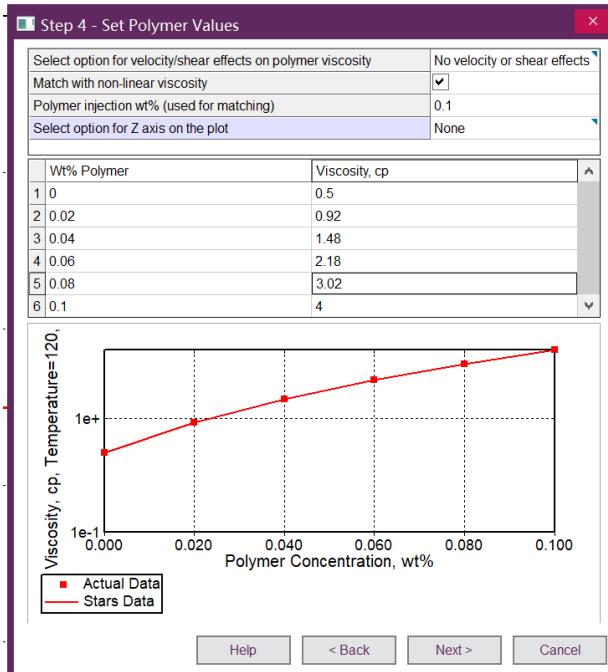
9. 出现信息弹出窗，点击OK。



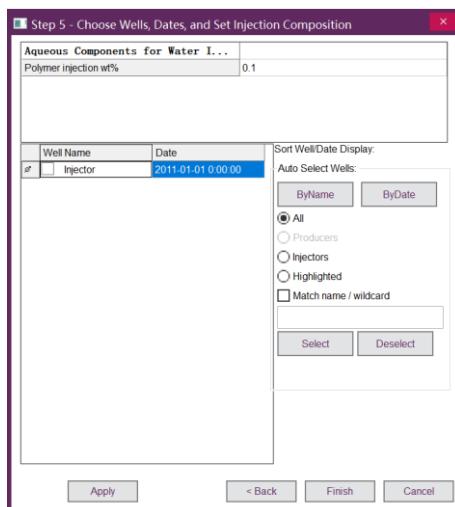
10. 在下一步中，“Select existing component for Polymer”后已出现 Polymer 组分，完点击“Next”。



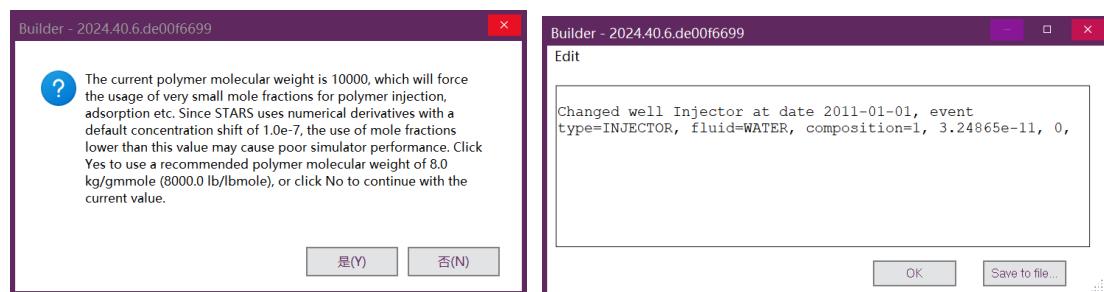
11. 在第 4 步中，输入不同聚合物浓度下的水相粘度。窗口中的值为此类过程的平均值，可直接复制“POLYMER SOLUTION VISCOSITIES.xls”中的数据，增加行使用 Ctrl+I，完成后点击“Next”和“Finish”。通过此步骤，聚合物浓度使用非线性粘度混合选项。



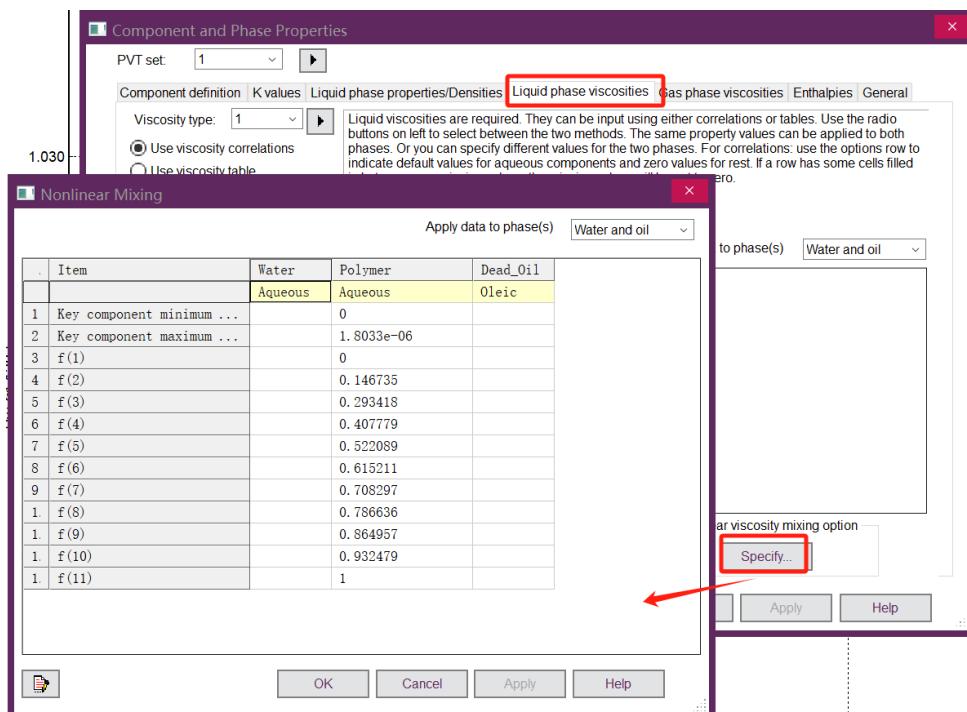
12. 最后一步，可以设置注入聚合物浓度，因注聚时间无法修改，因而此步骤暂不设置。



13. 点击 Finish 后，弹出关于关于聚合物分子量的警告，点击 N，第二个弹出框点击 OK。



14. 检查添加的各项参数。点击“Components”→→“Liquid Viscosities”，点击“Specify”按钮。注意：显示的浓度是代码外推的，即最大浓度现为 1.8033e - 6 (摩尔分数) 或约 1000 ppm。同时，我们通过增加粘度值保留了原始行为，点击两次“OK”接受更改。



定义聚合物注入浓度和时间

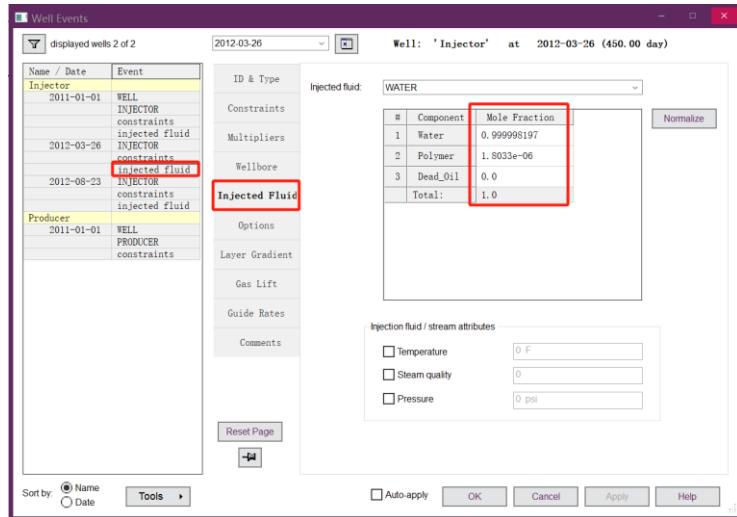
15. 点击菜单栏“Wells & Recurrent”按钮，选择“Well Events”。
16. 将顶部日期改为 2012 - 03 - 26 (第 450 天)，点击“Constraint”标签，勾选“Constraint Definition”框。
17. 点击“Injected Fluid”，按照以下比例更改组成：
 - 假设聚合物为 1000 ppm，根据以下公式计算：

$$x_i = \frac{(wt_i/Mw_i)}{\sum_{i=1}^{n_c} wt_i/Mw_i}$$

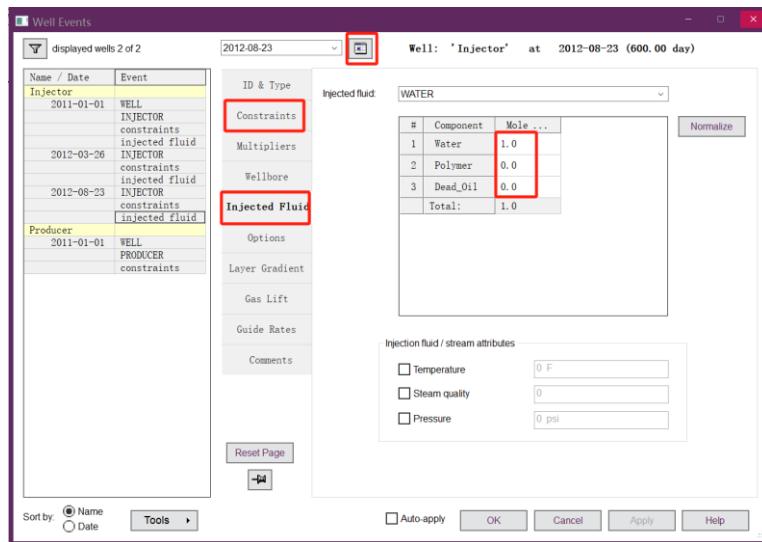
- 聚合物质量分数 = 1000 ppm / 1e6 = 0.001
- 聚合物摩尔分数 = (0.001 / 10000) / ((0.001 / 10000) + ((1 - 0.001) / 18.015)) = 1.8033e - 6

○ 水摩尔分数 = 1 - 1.8033e - 6 = 0.999998197

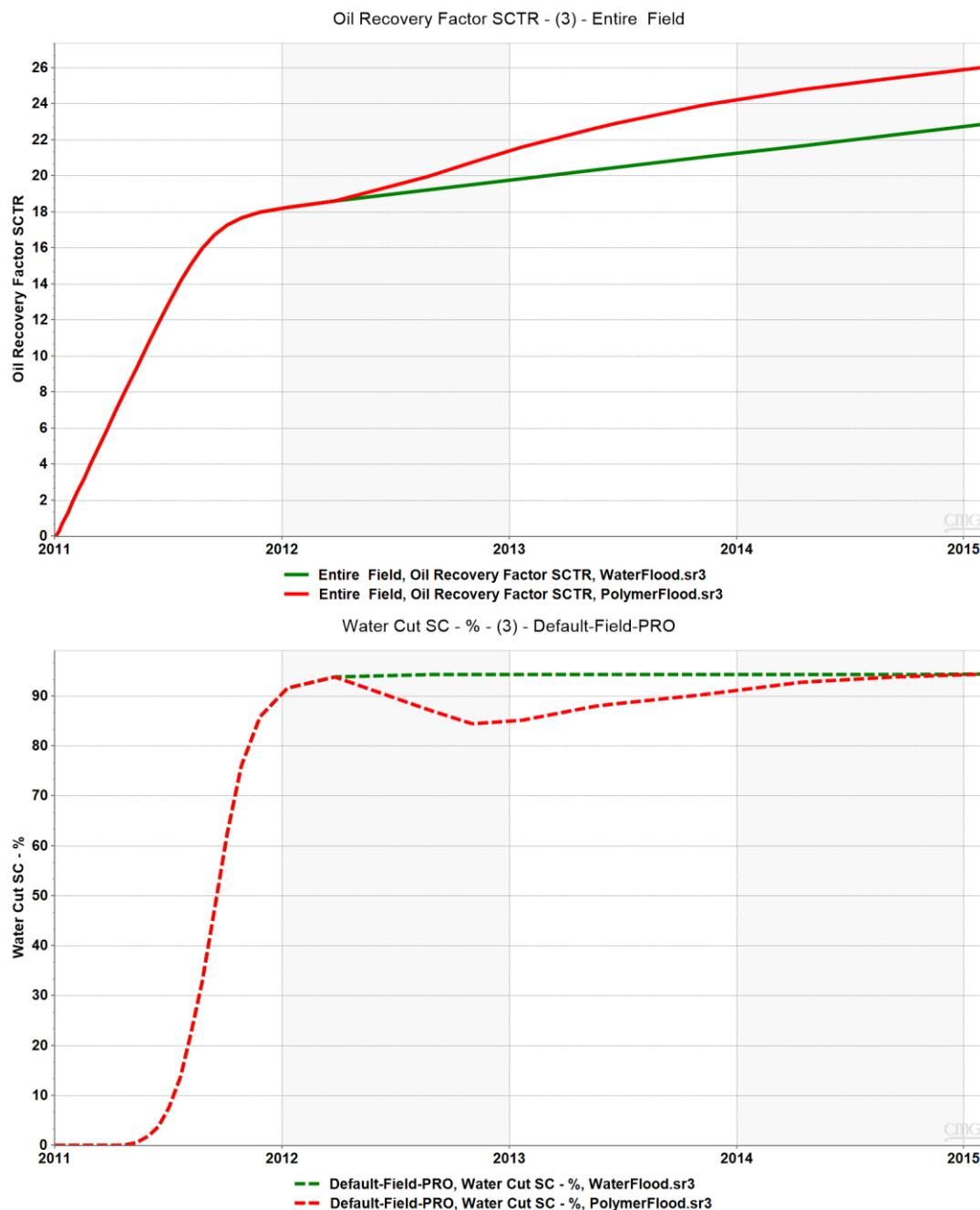
18. 完成后点击“Apply”。



19. 聚合物注入完成后，注聚井将切换回注入水。重复上述步骤，但将日期改为 2012 - 08 - 23（第 600 天），将注入流体组成改为 100% 水，点击“Apply”和“OK”。



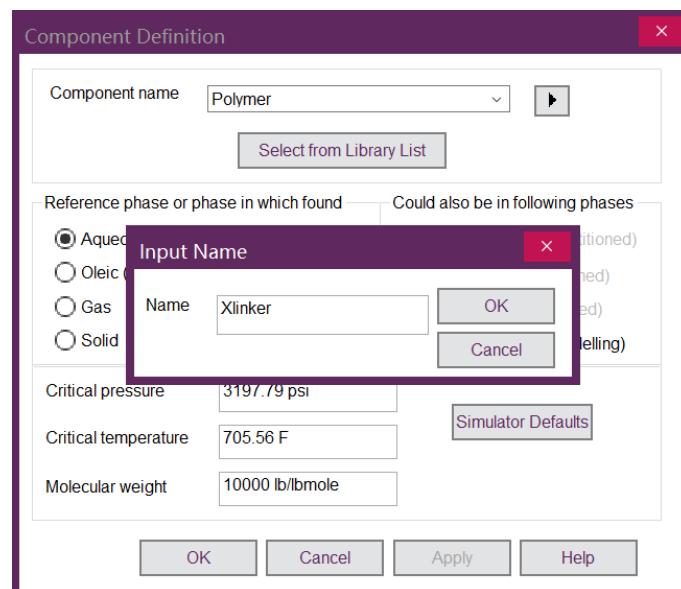
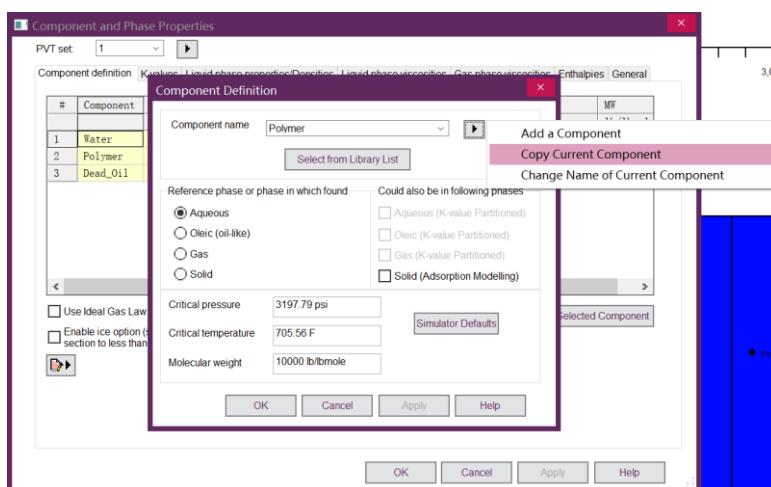
20. 保存数据文件，在 STARS 提交运算运行，与水驱结果与聚驱结果进行比较。

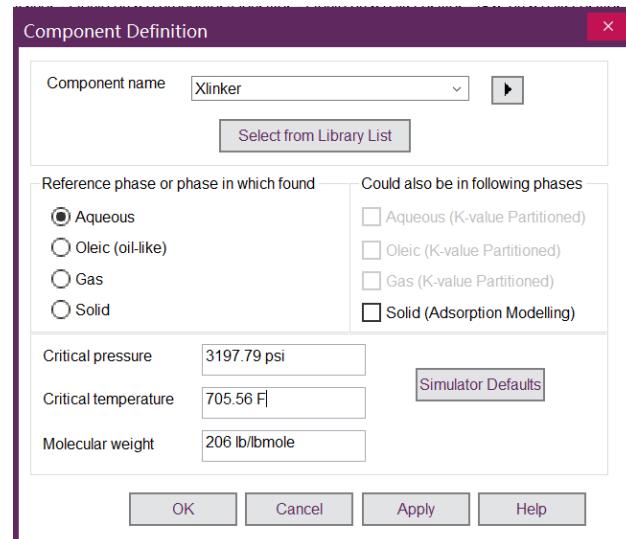


三、凝胶模型

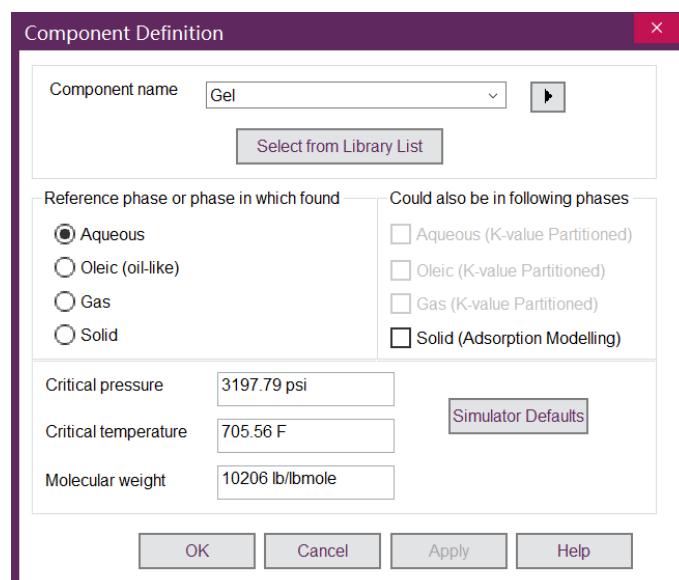
添加凝胶组分及属性

- 在 Builder 中打开“PolymerFlood.dat”文件，并另存文件为“GelInjection.dat”
- 点击“Components”，选择“Add/Edit Components”。在“Component and Phase Properties”窗口出现后，点击“Add/Edit a Component”按钮。
- 确保“Polymer”选中，点击组分旁边的箭头按钮，选择“Copy Current Component”，将新组分交联剂命名为“Xlinker”。其临界温度和压力与水组分相同，但分子量设为 206 lb/lbmol，点击“Apply”和“OK”。

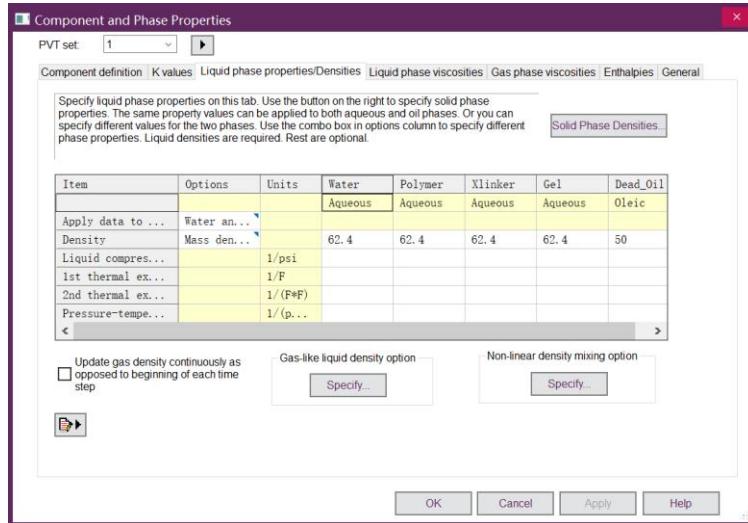




4. 重复上一步，将新组分命名为“Gel”。其相态、临界温度和压力与水组分相同，分子量假设为聚合物和 Xlinker 分子量之和，即 10206 lb/lbmol，点击“Apply”和“OK”。

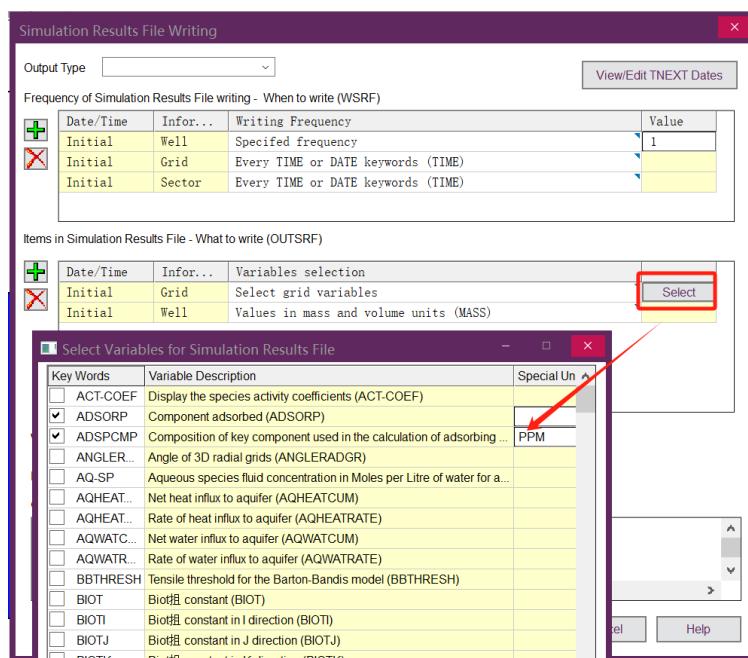


5. 在“Densities”标签页，输入以下密度，点击“Apply”和“OK”。

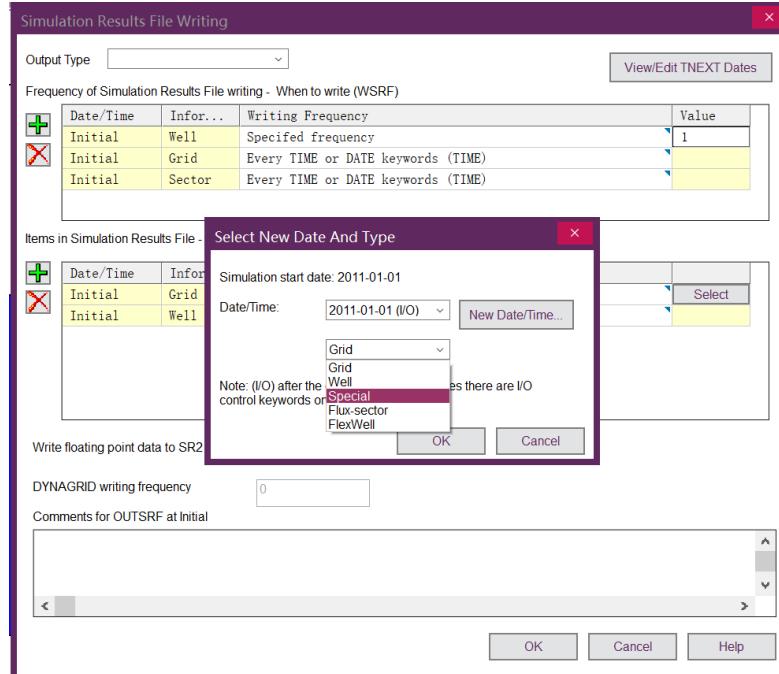


定义凝胶反应

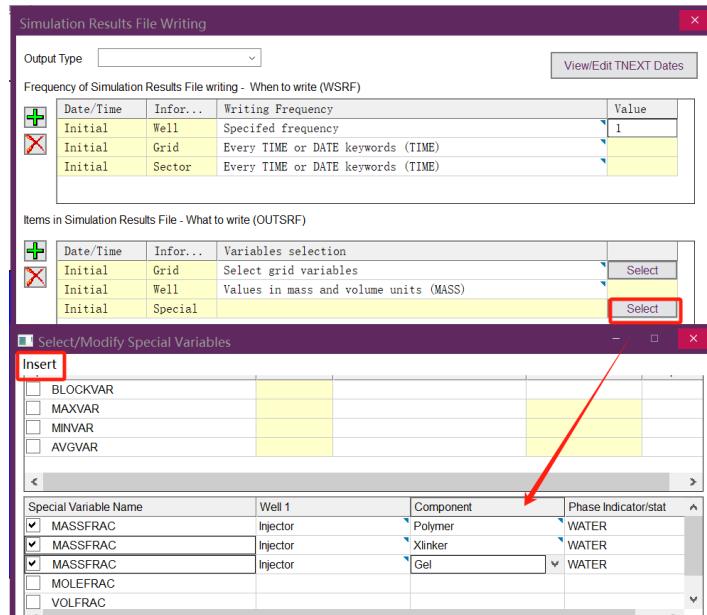
- 进入“I/O Control”部分，选择“Simulation results Output”，点击“Select Grid variables”旁边的“Select”按钮，选择以下参数：
 - 吸附组分 (ADSORP)
 - 用于计算吸附组分的关键组分组成 (ADSPCMP) → 特殊单位 = ppm
 - 用于水粘度非线性混合的关键组分组成 (VISWCOM)



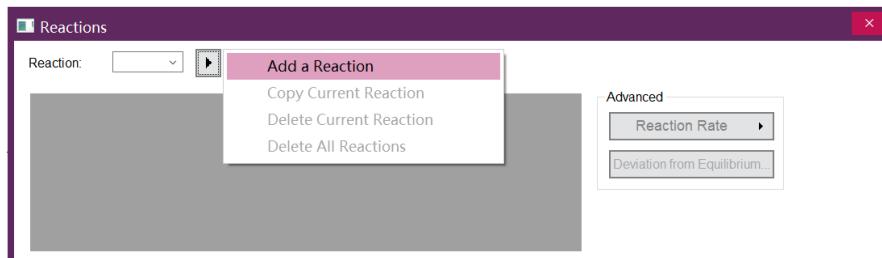
- 点击“OK”。
- 点击左侧绿色+添加 Special 变量。



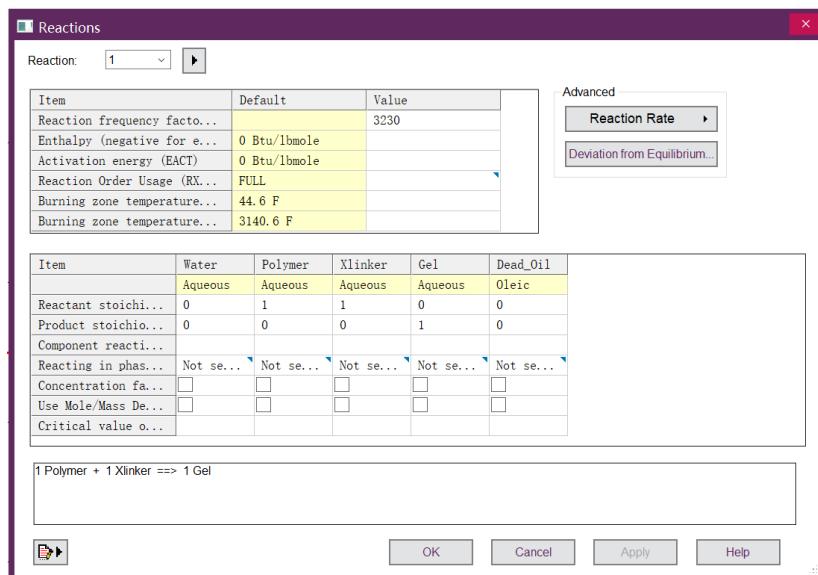
9. 点击“Select”按钮，选择生产井水相中聚合物的质量分数，通过点击窗口顶部的“Insert”选项，为 Xlinker 和 Gel 组分复制此变量，点击两次“OK”接受更改。



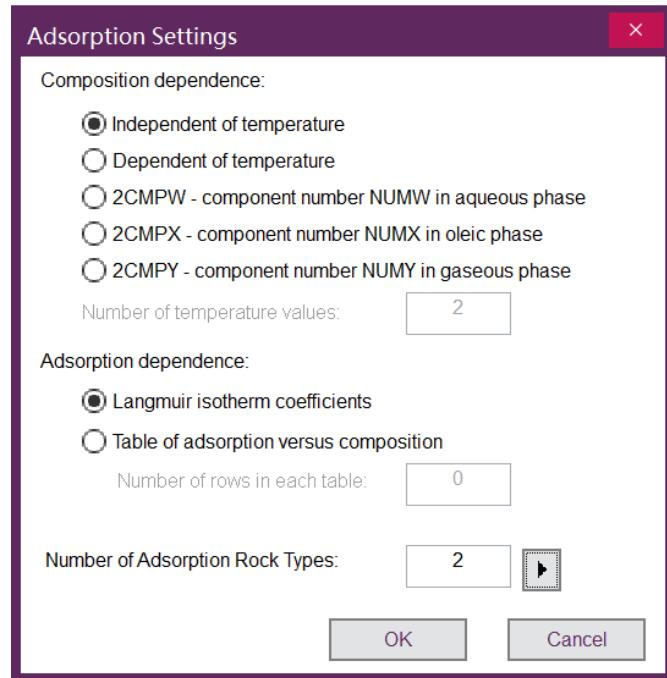
10. 进入“Component”部分，展开选项并选择“Reactions”，点击“Reaction”旁边的箭头，选择“Add a Reaction”。



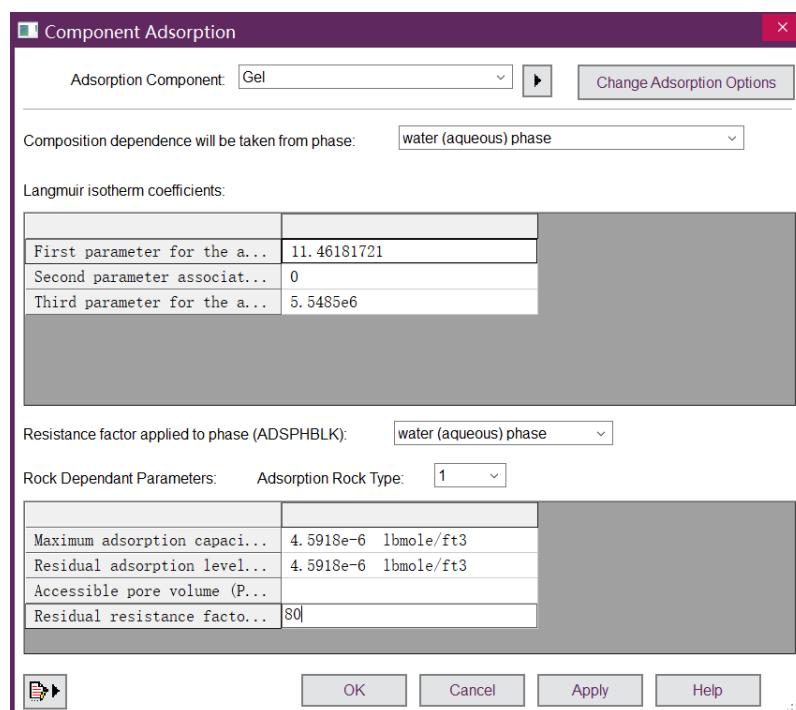
11. 输入反应频率因子（或反应速率）为 3230。输入反应物聚合物和 Xlinker 以及产物 Gel 的化学计量系数均为 1，点击“Apply”和“OK”接受反应。

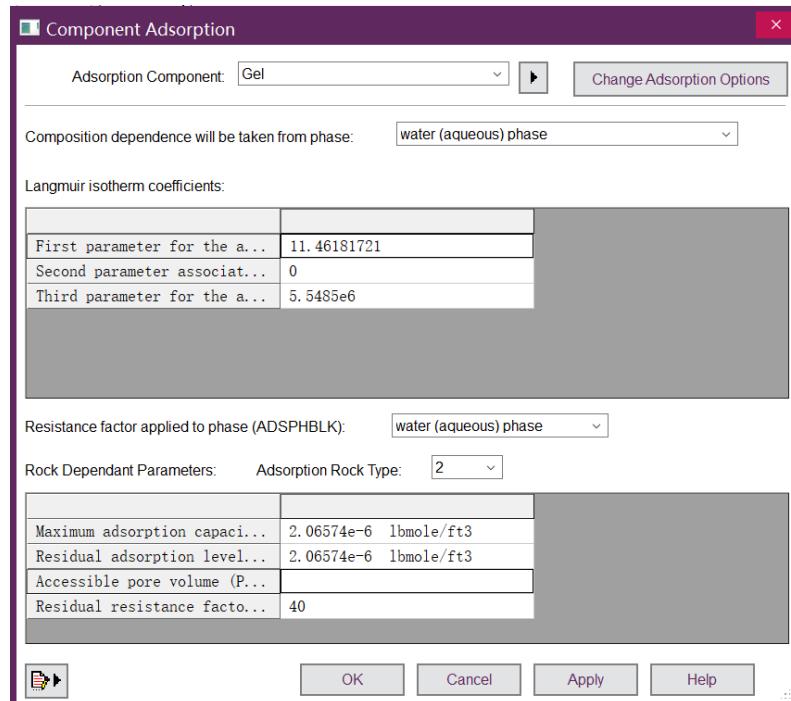


12. 进入“Rock Fluid”部分，选择“Adsorption Options”，由于存在两种岩性区域，我们将创建 2 种吸附岩性，选择如下所示的选项：

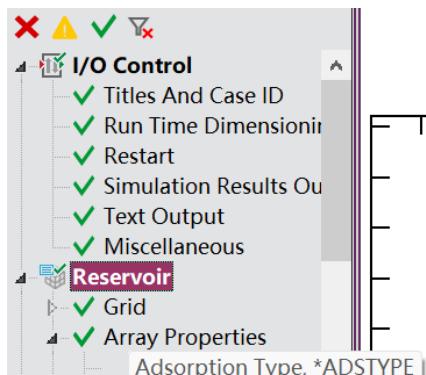


13. 再次进入“Rock Fluid”部分，选择“Adsorption Components”，点击箭头选择“Add Adsorption Component”，选择“Gel”组分被岩石吸附或捕获。
14. 输入如下所示的 Langmuir 系数，点击“OK”。

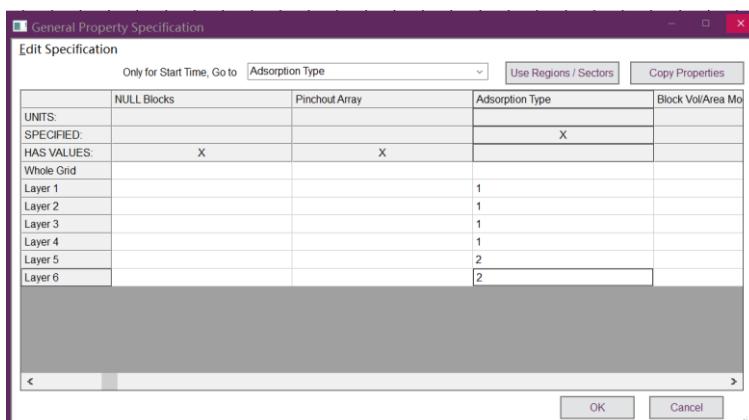




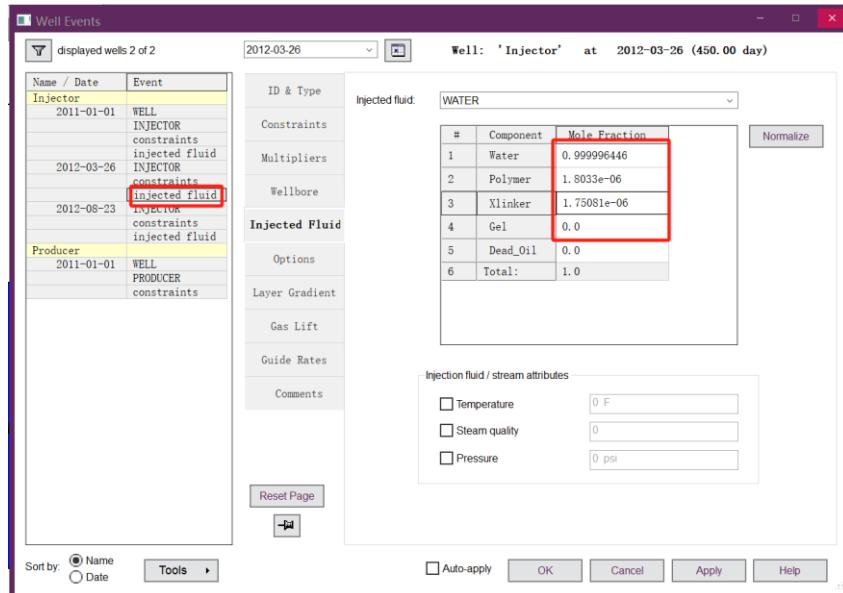
15. 进入“Reservoir”部分，展开“Array Properties”树，双击“Adsorption Type, *ADSTYPE”。



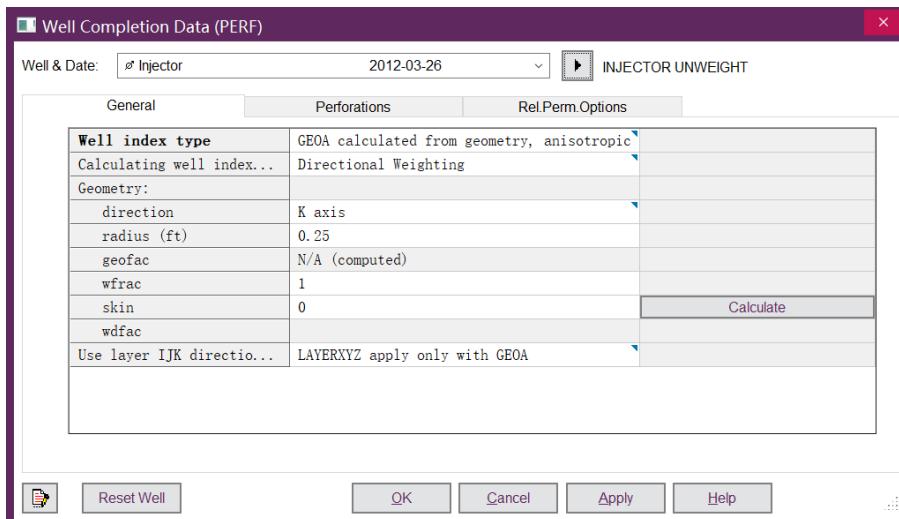
16. 将吸附岩性类型 1 分配给低渗透率层（第 1 – 4 层），将吸附岩性类型 2 分配给高渗透率层（第 5 – 6 层），点击两次“OK”计算网格块中的新属性。



17. 在井下双击“INJECTOR”，将顶部日期改为 2012 - 03 - 26（第 450 天），点击“Injected Fluid”标签，假设聚合物为 1000 ppm，Xlinker 为 200 ppm，按照以下比例更改组成，点击“apply”和“OK”。

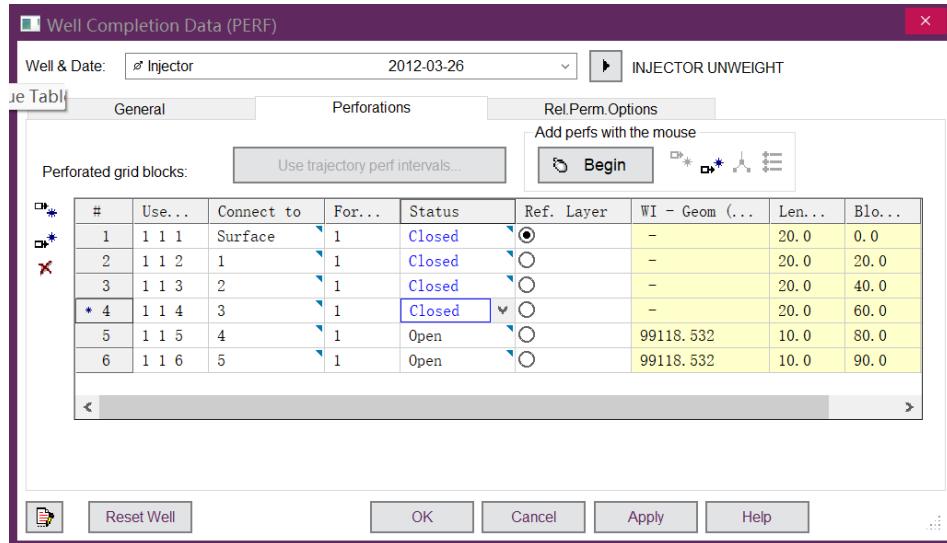


18. 进入“Wells & Recurrent”部分，选择“Well Completions (PERF)”选项，在“Well & Date”字段中选择注入井。
 19. 在井名旁边的箭头中选择“Completion - Copy to New”，并选择日期“2012 - 03 - 26”，点击“Apply”。



20. 重复上一步，选择第二个日期 2012 - 08 - 23，Apply。
 21. 为了用凝胶堵塞高渗透率层，关闭这些小层中的射孔。在“Well & Date”

字段中选择日期“2012 - 03 - 26”，进入“Perforations”标签，通过更改“Status”关闭对应第 1 - 4 层的射孔。



22. 保存文件为“GelInjection.dat”，提交 STARS 运行，并比较结果。

