

第 76 期：STARS 中多个蒸汽干度的区别及查看方法

编写人：王建国

目 录

1	水的性质	2
1.1	临界点 K 和饱和曲线.....	3
1.2	三个状态区.....	3
1.3	四组等参数线.....	3
2	各干度的含义	4
3	输出控制及查看方法	8
3.1	STQUAL 井筒内流动干度 (Special 输出指定位置)	8
3.2	STMQUAL 井底流动干度 (适用灵活井模型)	10
3.3	QUALBLK 油藏 (网格) 流动干度.....	12
3.4	STEAMQUAL 油藏 (网格) 静态干度	15
4	应用案例：灵活井井筒内蒸汽干度的输出	16

在用 STARS 做热采模拟时，蒸汽干度是需要经常考察的一个参数。

首先回顾一下蒸汽干度的含义。蒸汽干度 (steam quality) 一般是指每千克湿蒸汽中含有干饱和蒸汽的质量分数。在一定压力下的沸腾点温度产生的蒸汽称为干饱和蒸汽，此时干度为 1。但热采开发中一般很少产生 100% 的干蒸汽，通常都带有一定量的液滴。如果水蒸汽中含有 10% 质量的液态水分，则蒸汽干度为 0.9。

蒸汽注入过程中，经过这样一个流动路径：从锅炉（蒸汽发生器）出口，经过地面管线到达井口，然后经过井筒到达井底，有时还会从油管到环空再到射孔点，穿过射孔或通过裸眼进入油藏，最后在复杂的油藏内流动，如图 1 所示。这一路下来，随着沿程压力、温度及热损失的变化，蒸汽干度也会发生变化。

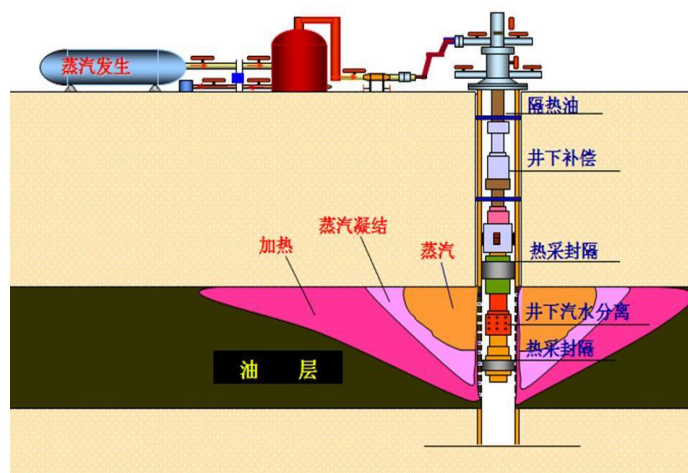


图 1 蒸汽流动路径示意图

那么到底有哪些因素会影响蒸汽干度的变化呢？下面先来认识一下水的性质。

1 水的性质

首先从水的压力-热焓图说起，如图 2 所示。该图纵坐标是绝对压力，横坐标是比焓值 H 。我们从以下几个方面来认识水的性质。

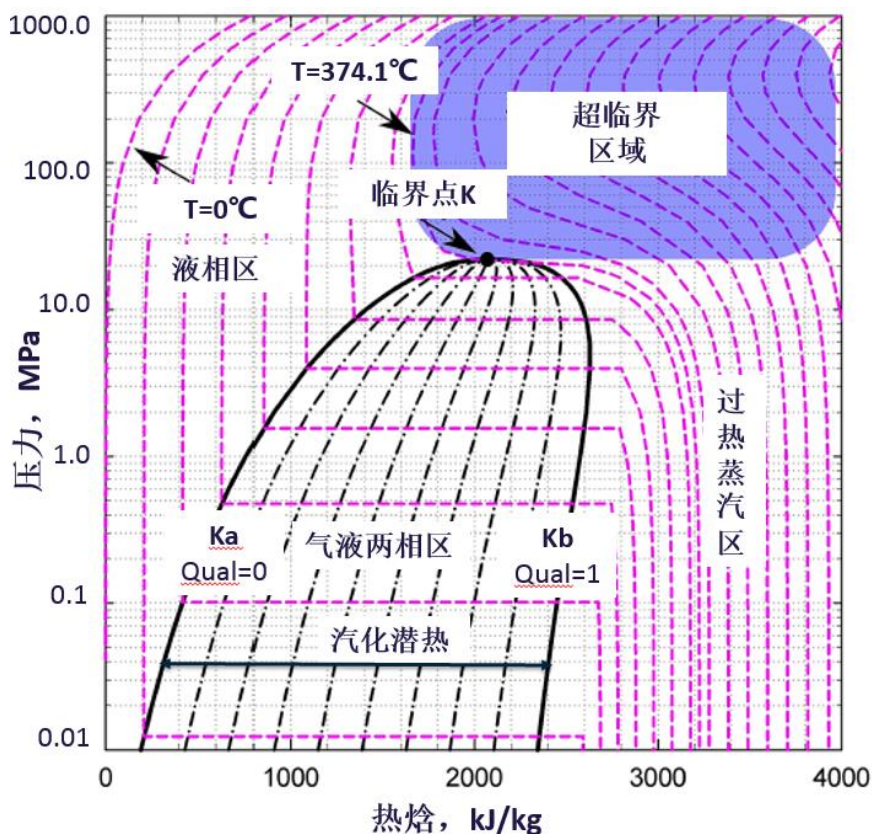


图 2 水的压力-热焓图

1.1 临界点 K 和饱和曲线

临界点 K 为两根粗实线的交点。在该点, 水的液态和气态差别消失, 水的密度和它的饱和蒸汽密度相等, 这种状态叫做水的临界状态。这时, 就分不出水和蒸汽的界限, 水在不需要汽化潜热的情况下就成为饱和蒸汽。水的临界压力值为 22.13MPa, 临界温度值为 374.15℃。

K 点左边的粗实线 Ka 为饱和液体线, 也叫泡点线, 在 Ka 线上任意一点的状态, 均是相应压力的饱和液体, 干度为 0。

K 点的右边粗实线 Kb 为饱和蒸汽线, 也叫露点线, 在 Kb 线上任意一点的状态均为饱和蒸汽状态, 或称干蒸汽, 干度为 1。

1.2 三个状态区

Ka 左侧——液相区, 该区域内水的温度低于给定压力下的饱和温度。比如我们生活中的水, 在大气压下, 其温度低于其饱和温度 100℃。

Kb 右侧——过热蒸汽区, 该区域内的蒸汽温度高于给定压力下的饱和温度, 过热蒸汽中没有液相。例如在大气压下, 如果把水加热到 100℃ 以上, 则全部变为蒸汽。

Ka 和 Kb 之间——湿蒸汽区, 即气液共存区或气液两相区。该区内水处于饱和状态, 压力和温度为——对应关系。所以在用 STARS 做常规的热采(注湿蒸汽)模拟时, 只需要输入蒸汽的温度和干度即可, 压力可从饱和状态导出。

1.3 四组等参数线

(1) 等压线: 图上与横坐标轴相平行的水平细虚线均是等压线, 同一水平线的压力均相等。

(2) 等焓线: 图上与横坐标轴垂直的细虚线为等焓线, 不论其状态如何, 同一等焓线上的焓值均相同。

(3) 等温线: 图上用粉色点划线表示的为等温线。等温线在不同的区域变化形状不同, 在液相区等温线几乎与横坐标轴垂直; 在气液两相区却是与横坐标轴平行的水平线; 在过热蒸汽区为向右下方急剧弯曲的倾斜线。

(4) 等干度线: 从临界点 K 出发, 把气液两相区内相同的干度点连接而成的线为等干度线, 图中是 Ka 和 Kb 之间的黑色虚线。它只存在于气液两相区内。

上述四个状态参数 (p 、 h 、 t 、 x) 中, 只要知道其中任意两个状态参数值, 就可确定水的热力状态。在压力-热焓图上确定其状态点, 可查取该点的其余四个状态参数。

热采中采用的蒸汽一般都是湿蒸汽, 即蒸汽干度小于 1 的含有液态水的饱和蒸汽, 偶尔也使用过热蒸汽。湿蒸汽的焓表示为:

$$H = H_w + X L_v$$

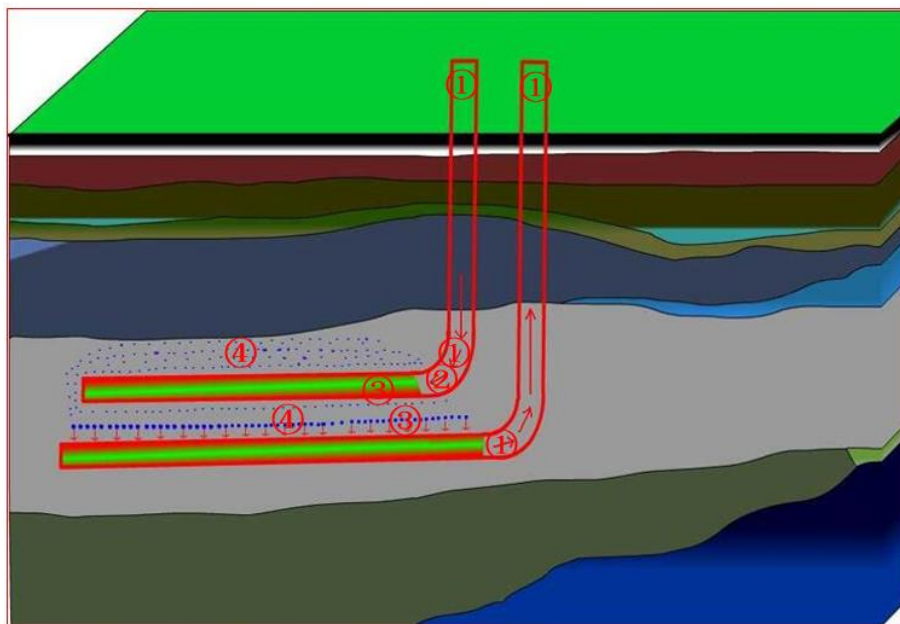
式中 H —湿蒸汽的焓, kJ/kg ;
 H_w —饱和水的焓, kJ/kg ;
 L_v —汽化潜热, kJ/kg ;
 X —湿蒸汽的干度。

由于汽化潜热是液体转化为蒸汽时温度不变而吸收的热量, 在压力—热焓图中, 汽化潜热是在一定压力下露点线与泡点线之间横坐标的差值, 如图 2 所示。由此可知, 蒸汽的干度主要受热焓和压力、温度的影响。STARS 中对于湿蒸汽只需要输入注汽温度和干度即可确定热焓, 而对于过热蒸汽, 除了定义干度为 1 之外, 还需要输入压力和温度才能确定热焓。

水的气液两相体系在不同的状态下, 其干度的计算方法是不同的。在如上所述的稳定状态下, 干度是压力和温度的函数, 也就是说在一个密闭的容器内, 在某一压力和温度下达到气液平衡时, 干度只受压力和温度影响。而在流动状态下, 干度则取决于气相或液相的相对流度。本文暂且将前者称为静态干度, 后者称为流动干度。在油藏数值模拟中, 只有油藏网格中考虑静态干度, 而蒸汽在井筒内或油藏中流动过程中的干度均属于流动干度。

2 各干度的含义

在油藏数值模拟过程中, 用户需要清楚的知道注入的蒸汽在井口、井筒内不同位置 (泵、各个射孔点或参考深度) 以及油藏不同位置的干度值, 以便更好的控制注蒸汽开发效果。



①STQUAL ②STMQUAL ③QUALBLK ④STEAMQUAL

图 3 4 个干度关键字代表的位置示意图

STARS 模拟器可以计算并输出蒸汽从井口到井底以及到油藏各个位置的干度，并为此设计了 4 个关键字，用于输出不同条件下的蒸汽干度（steam quality）值，见图 3 和表 1。这些参数根据其数据计算方法和应用环境不同，含义也不完全相同。用户使用过程中容易将其混淆，本文就此做一梳理。

表 1 STARS 中输出的干度关键字汇总

参数名称	项目	内容
井筒内 流动干度	关键字	STQUAL
	干度类型	流动干度
	位置	井筒内（井口、泵、井底、指定射孔点）
	使用格式	*OUTSRF *SPECIAL PHWELL well STQUAL ... (直井段的井口、泵或井底)
		*OUTSRF *SPECIAL WELL_LAYER well uba STQUAL (指定射孔点)
备注	有*HEAD-METHOD *GRAV-FRIC-HLOS 或*PHWELLBORE 时才能输出， 输出时需要指定位置。	
井筒内流动干 度	关键字	STMQUAL
	干度类型	流动干度
	位置	注汽井井底



	使用格式	*OUTSRF *SPECIAL STMQUAL well (井底或参考位置处的射孔点)
		*OUTSRF *FLEXLAYER *STMQUAL (所有射孔点)
	备注	输出时不需要指定具体位置
指定网格的流动干度	关键字	QUALBLK
	干度类型	流动干度
	位置	指定网格或所有网格
	使用格式	*OUTSRF *SPECIAL special_his QUALBLK 或 *OUTSRF *GRID
	备注	输出指定网格的流动干度或油藏最大，最小或平均流动干度随时间的变化
油藏所有网格的静态干度	关键字	STEAMQUAL
	干度类型	静态干度
	位置	所有网格
	使用格式	*OUTSRF *GRID STEAMQUAL

表 1 中除 STEAMQUAL 之外，其余干度均是指流动状态下的值。井的参数 STMQUAL 和 STQUAL 是进行井筒中流动项（不是累积项）计算时用到的。

下面就对这些参数的具体含义及输出方法逐一介绍。

根据注蒸汽过程中各干度出现的先后顺序，如图 1 所示，分别介绍 STQUAL、STMQUAL、QUALBLK 和 STEAMQUAL 这四个关键字的含义、区别与联系。

首先介绍 STQUAL。STQUAL 有两种用途：

- 1) 使用 SAM 半解析井筒热损失计算关键字*PHWELLBORE（详细可参考第 19 期讲义）时，与*SPECIAL *PHWELL 组合，输出井口（SURFACE）或井底（DOWNHOLE）处的流动干度，此时对注入井和生产井均适用。也可以输出泵深（PUMP）处的流动干度，但只能用于生产井。
- 2) 使用 *HEAD-METHOD *GRAV-FRIC-HLOS 时，与 *SPECIAL WELL_LAYER 组合，输出注入井各射孔处井筒内的流动干度。此时只能用于注入井。

由此可知，STQUAL 的使用是需要前提条件的，如果模型中既没有使用 *PHWELLBORE（从井口到第 1 个射孔之间的直井段），也没有使用 *HEAD-METHOD *GRAV-FRIC-HLOS，那就没法输出（即使 Builder 界面中可

以选择输出, 其输出的数值也是没有意义的)。

下面介绍 STMQUAL。STMQUAL 是指蒸汽在井筒内射孔处的流动干度值。该关键字用于源汇井和灵活井输出时要求不同:

1) 用于源汇井井筒内干度输出时: 不要求必须使用 *PHWELLBORE, 或者 *HEAD-METHOD *GRAV-FRIC-HLOS, 但是只对注入井有效, 不能输出生产井井筒内的干度。

用于源汇井模拟时该关键字的取值又分两种情况:

- ①没有使用 SAM 半解析井筒热损失计算关键字 *PHWELLBORE, 此时就等于通过 *QUAL 输入的井底干度值。
- ②使用了 *PHWELLBORE, 此时就等于通过半解析井筒热损失计算得到的第一个射孔处的井筒内流动干度值。

2) 用于灵活井井筒内干度输出时: 对井的类型没有限制, 可以输出灵活井井筒内各节点的干度随时间的变化。

综上, STMQUAL 与 STQUAL 都是指的井筒内流动干度, 二者既有共同点, 也有不同点。共同点有:

2) STQUAL 的位置为 DOWNHOLE 时, 二者是相等的。

在井筒内干度为 STQUAL 或 STMQUAL 的蒸汽进入油层之后, 其干度立即变成网格的流动干度 QUALBLK。虽然同样位于射孔处, 井筒外的流动干度 QUALBLK 和井筒内的流动干度 STQUAL 或 STMQUAL 很少完全相等, 当然在达到拟稳态条件后可以非常接近。这是因为在热焓保持不变的前提下, 井筒内外压力的变化会造成干度发生变化, 见图 2。这种现象即使在孤立的一维网格中也可以观察到。某网格的 QUALBLK 值反映了从该网格流向下游网格的流体的干度值。

油层网格内除了流体的流动干度 QUALBLK 外, 还存在一个平衡状态下的静态干度 STEAMQUAL。STEAMQUAL 将质量分数的概念应用在地层静态环境中, 因此其值取决于流体相的饱和度。因为气相通常比液相流动能力强, 在同样的条件下, 静态干度 STEAMQUAL 的值一般远低于流动干度 QUALBLK 的值。

以上这四种干度的应用环境和使用条件见表 1。

3 输出控制及查看方法

理解了各个干度的含义和适用环境之后，下面介绍各参数在前后处理 Builder/Results 中的输出控制及查看方法。

3.1 STQUAL 井筒内流动干度（Special 输出指定位置）

前面介绍了 STQUAL 可用于输出井筒内流体的流动干度。分两种情况：

1) 使用 SAM 井筒热损失计算关键字*PHWELLBORE 时，与 PHWELL 组合，输出井口或井底处流动干度。此时对注入井和生产井均适用。也可以输出泵深（PUMP）处的流动干度，但只能用于生产井。

2) 使用*HEAD-METHOD *GRAV-FRIC-HLOS 时，与 WELL_LAYER 组合，输出注入井各射孔点处的井筒内流动干度。此时只能用于注入井。

这两种可以同时使用。

在 Builder 中，通过 I/O Control → Simulation Results Output，添加 Special 输出，选择井号和位置（井口，井底，泵，或指定某一网格）。

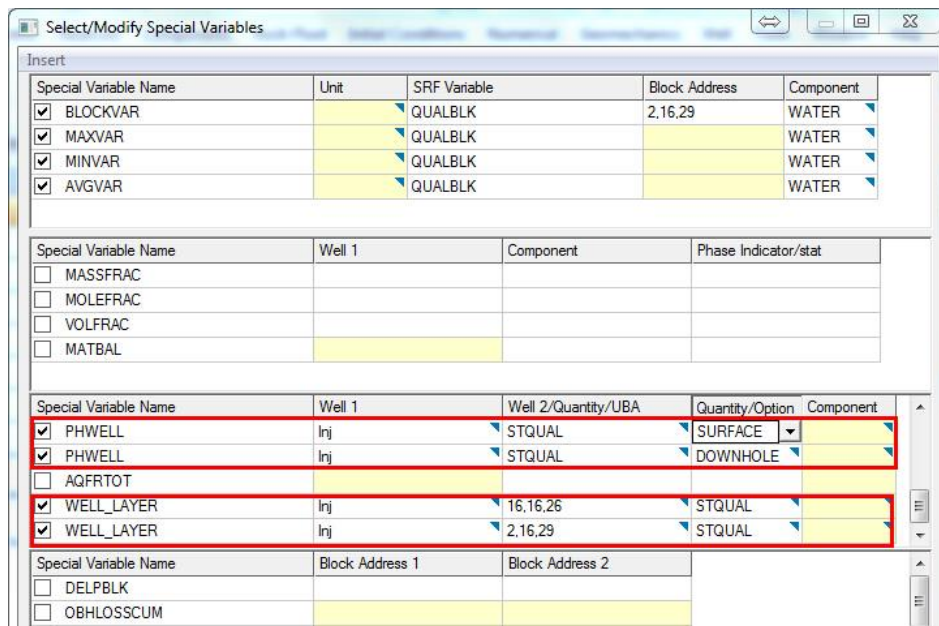


图 4 Builder 中 STQUAL 的输出控制

对应在*.dat 文件中的写法为：

```
*OUTSRF *SPECIAL *PHWELL 'Inj' STQUAL SURFACE
*PHWELL 'Inj' STQUAL DOWNHOLE
*WELL_LAYER 'Inj' 16,16,26 STQUAL
*WELL_LAYER 'Inj' 2,16,29 STQUAL
```

在 Results Graph 中输出干度变化的曲线，注意是 Special History 属性，见图 5。

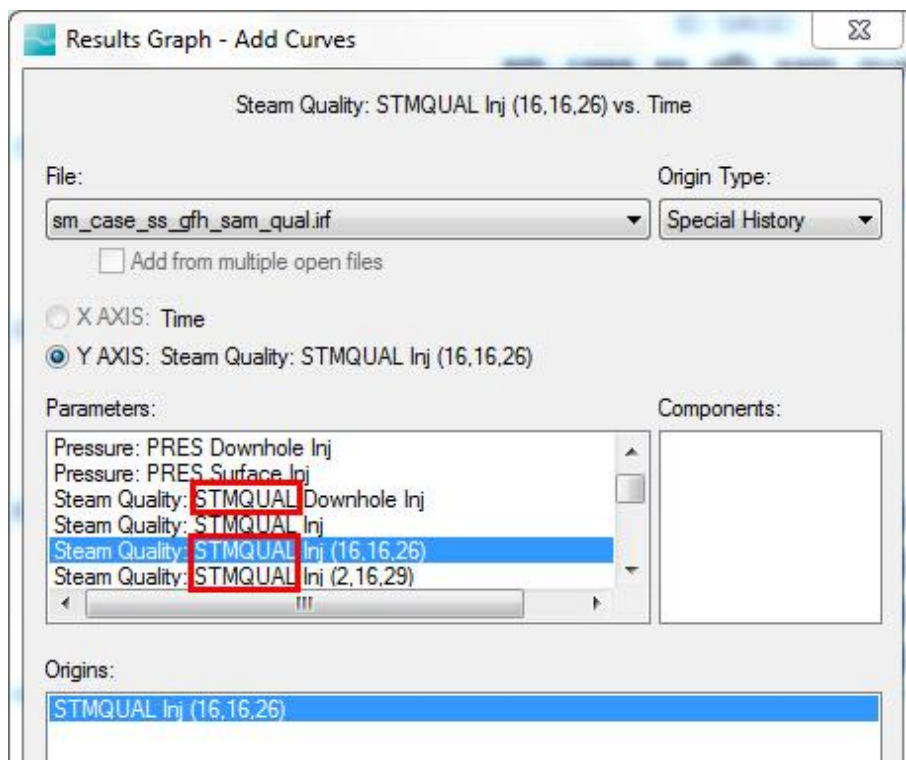


图 5 在 Results Graph 中画 STQUAL 的变化曲线

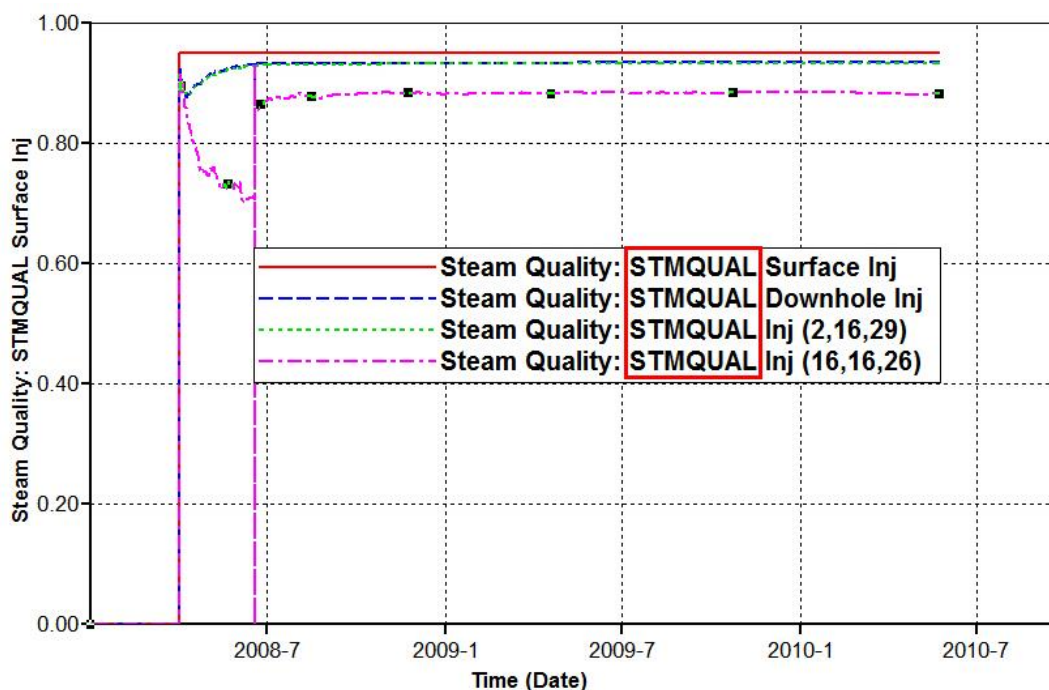


图 6 在 Results Graph 中输出的 STQUAL 变化曲线

注意，图中红框内显示 STMQUAL 实际是输出控制中 STQUAL 对应的参数。

3.2 STMQUAL 井底流动干度（适用灵活井模型）

STMQUAL 是指注入的蒸汽在进入油层前在井底的流动干度值，因此其参数都是针对注入井而言的。其取值分为两种情况：

1) 没有使用 SAM 井筒热损失计算关键字*PHWELLBORE，此时取值等于注入流体的干度*QUAL 值。

2) 使用了 SAM 井筒热损失计算关键字*PHWELLBORE，此时取值等于第一个射孔处井筒内的流动干度。

因此 STMQUAL 的输出不需要指定具体位置，只需要给出井号即可。在 Builder 中，通过 I/O Control → Simulation Results Output，添加 Special 输出。

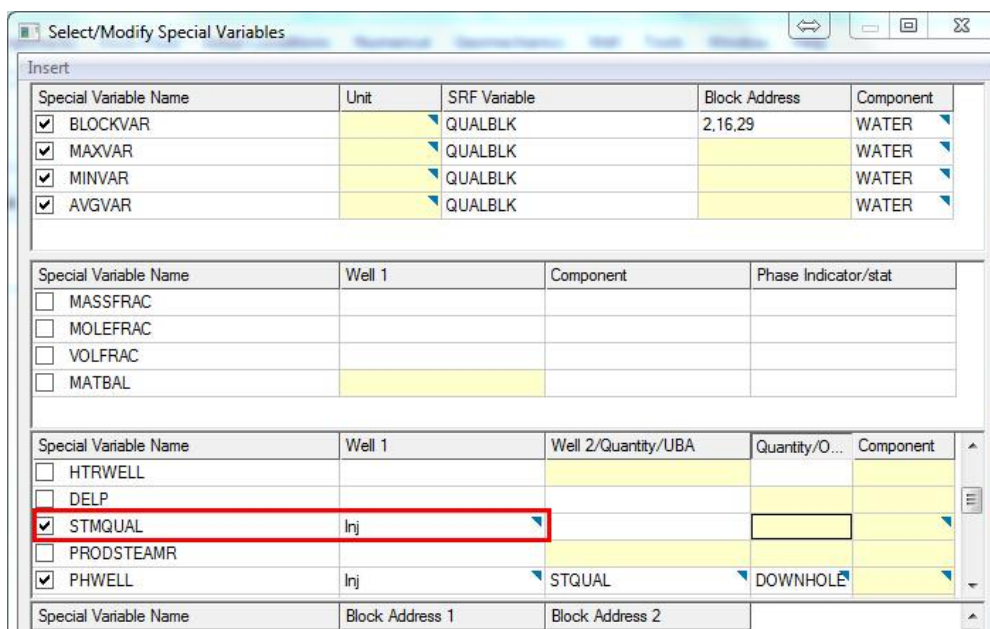


图 7 Builder 中 STMQUAL 的输出控制

注意，此处只能选一口井。若想输出多口井的干度值，需要点击左上角的 Insert 按钮，对当前行拷贝，然后选择其他要输出的井号。若选择的井类型为生产井，则其输出值没有意义。

对应在*.dat 文件中的写法为：

```
*OUTSRF *SPECIAL *STMQUAL 'Inj'
```

在 Results Graph 中输出干度变化的曲线，注意是 Special History 属性。

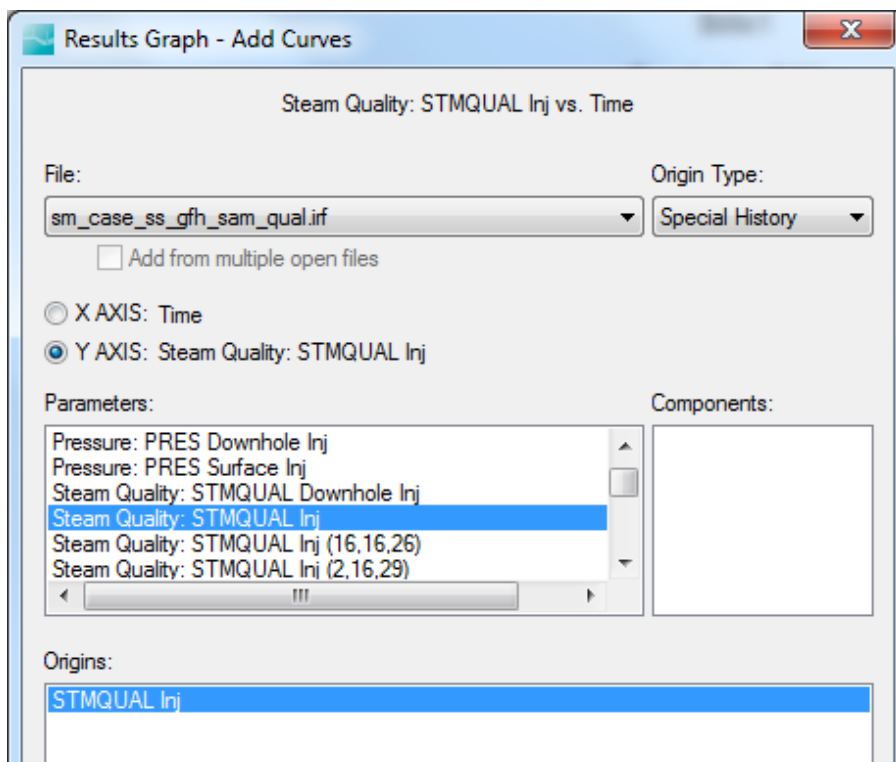


图 8 在 Results Graph 中画 STMQUAL 的变化曲线

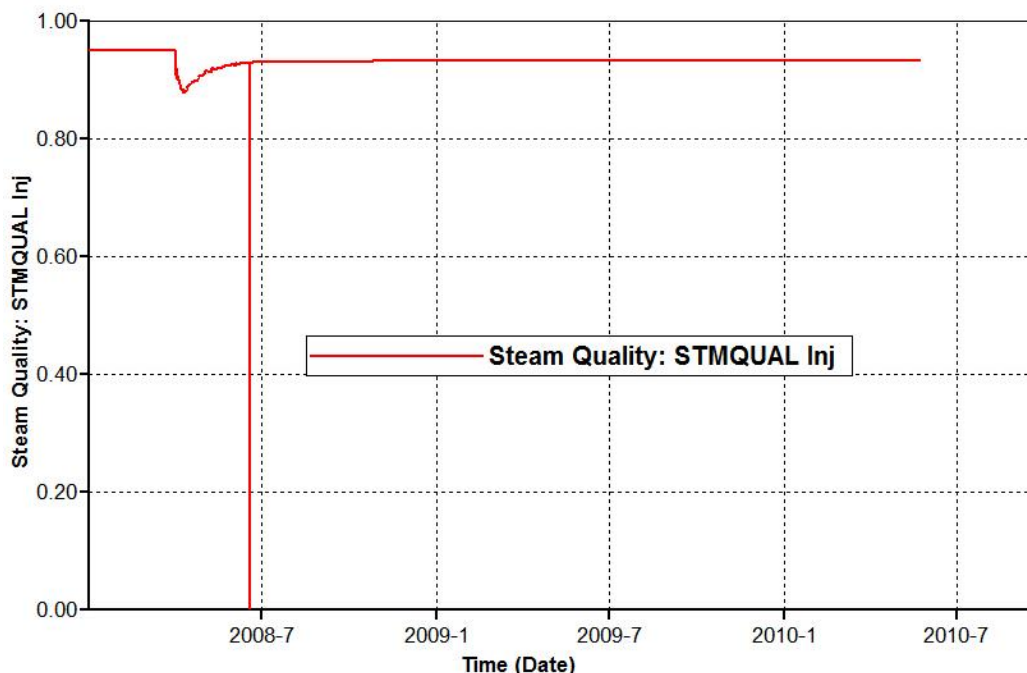


图 9 在 Results Graph 中输出的 STMQUAL 变化曲线

仔细对比图 9 和图 6 的曲线可以发现，图 9 的曲线与图 6 中的第 2 和第 3 条曲线相同，这是因为虽然输出的参数名称和方法不同，但是指向的都是同一位置的井筒内流动干度，所以数值应该是相同的。

3.3 QUALBLK 油藏（网格）流动干度

QUALBLK 不输出所有网格的值，一般有 4 种用途：

- 1) 根据需要输出个别网格处的值随时间的变化；
- 2) 输出所有网格中最大值随时间的变化；
- 3) 输出所有网格中最小值随时间的变化；
- 4) 输出所有网格的平均值随时间的变化。

在 Builder 中，通过 I/O Control → Simulation Results Output，添加 Special 输出，见图 10。

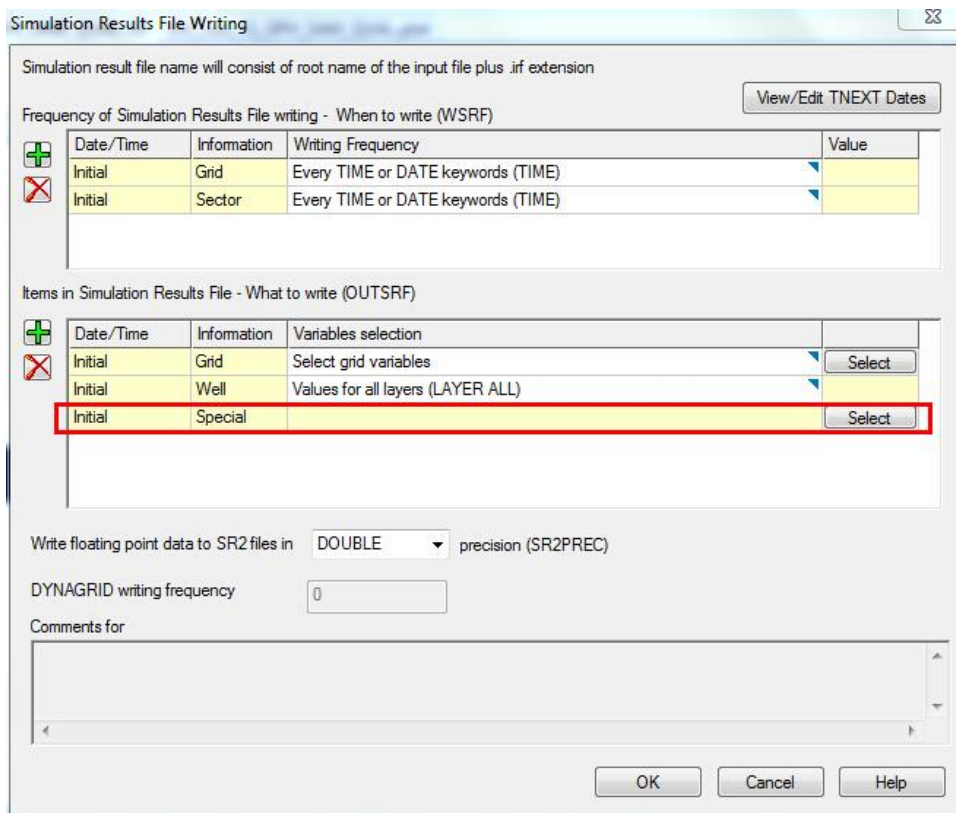


图 10 Builder 中 QUALBLK 的输出控制（1）

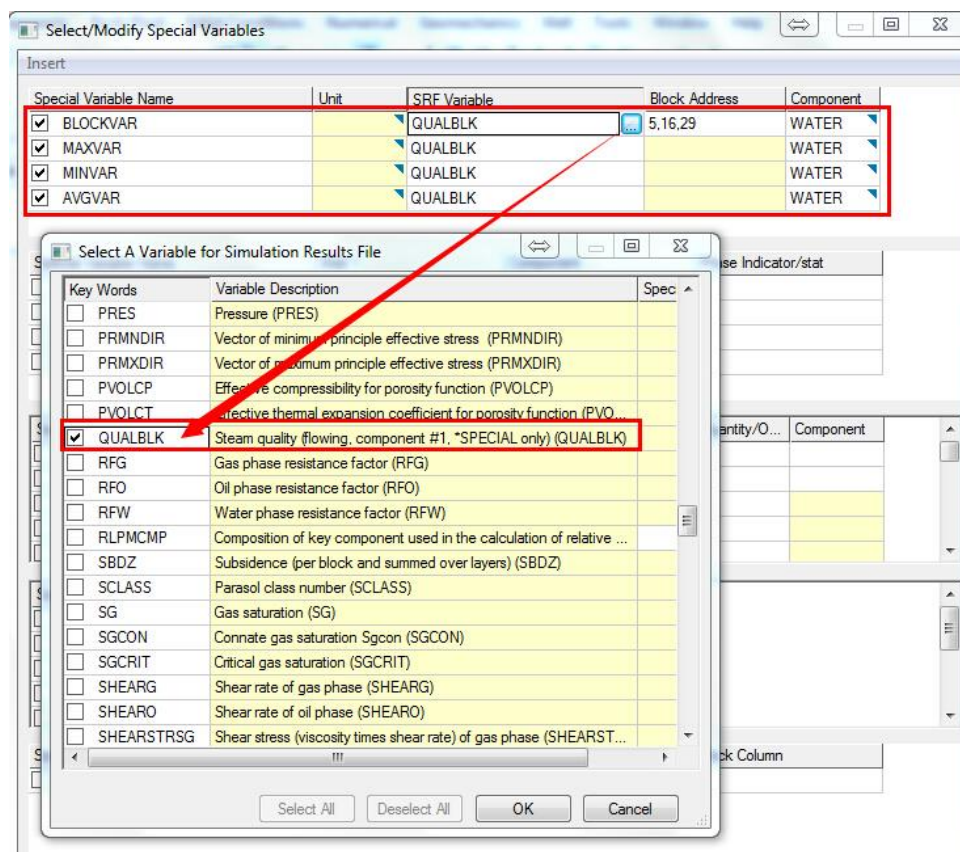


图 11 Builder 中 QUALBLK 的输出控制 (2)

对应在*.dat 文件中的写法为:

```
*OUTSRF *SPECIAL *BLOCKVAR QUALBLK 5,16,29 'WATER'
      *MAXVAR QUALBLK 'WATER'
      *MINVAR QUALBLK 'WATER'
      *AVGVAR QUALBLK 'WATER'
```

在 Results Graph 中输出干度变化的曲线，注意是 Special History 属性。

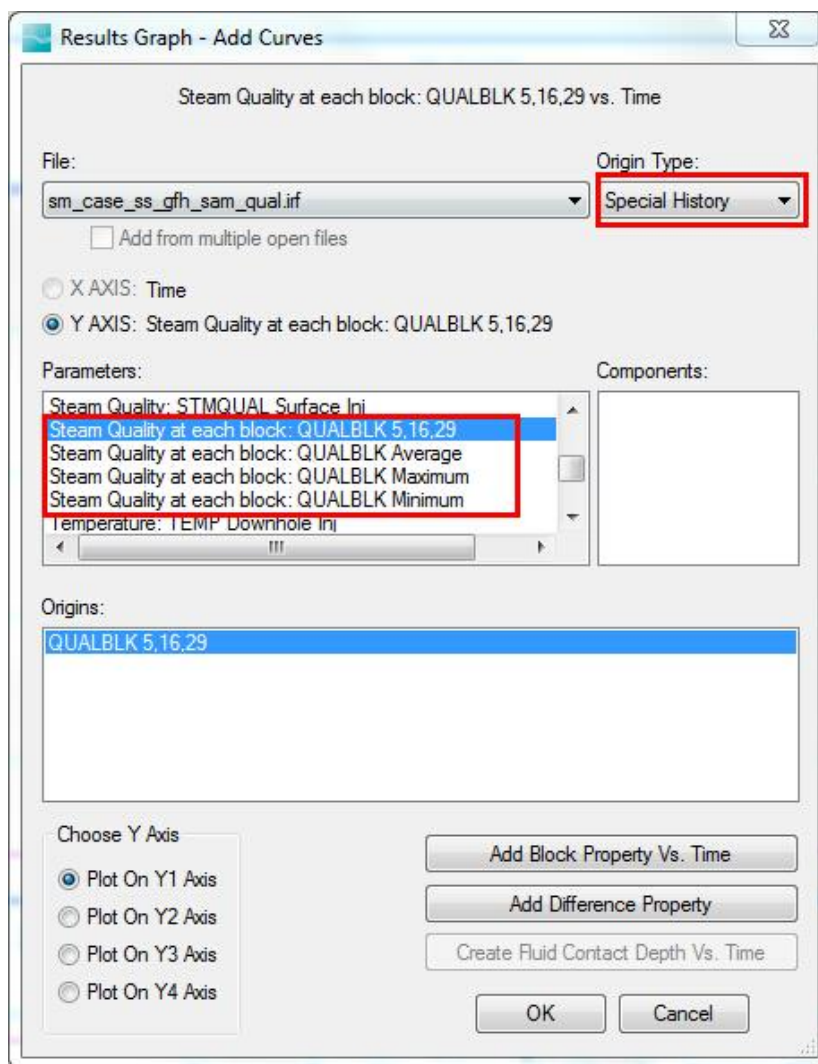


图 12 在 Results Graph 中画 QUALBLK 的变化曲线

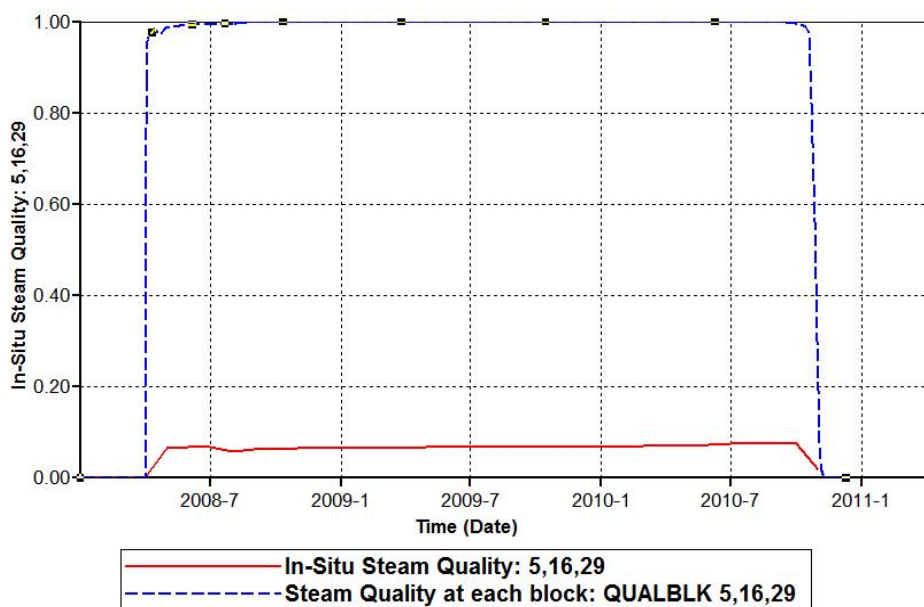


图 13 在 Results Graph 中输出的 QUALBLK 变化曲线

3.4 STEAMQUAL 油藏（网格）静态干度

STEAMQUAL 属于网格静态参数，可以通过 Builder → I/O Control → Simulation Results Output，见图 14，选择 Grid 参数来控制输出所有网格的干度随时间变化的值，见图 15。

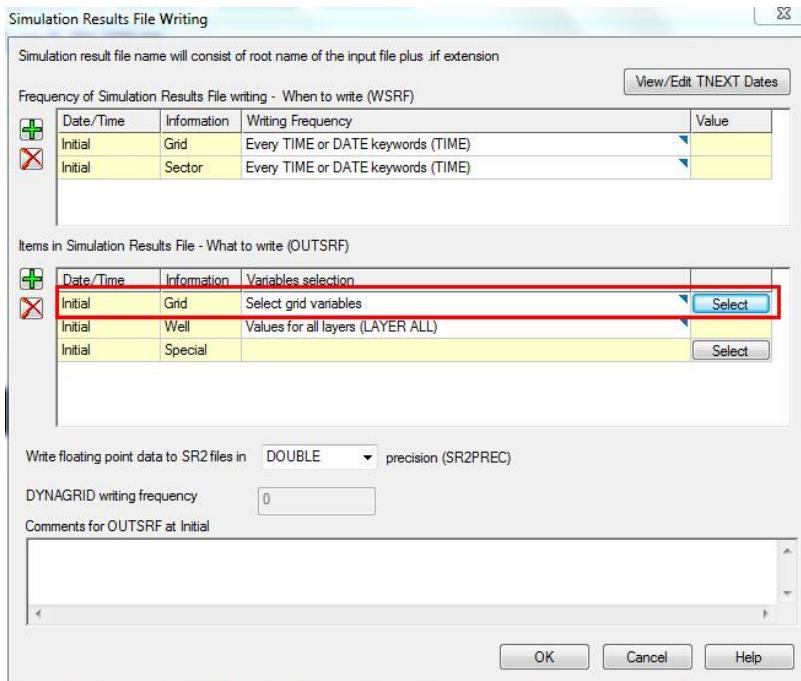


图 14 打开参数输出控制界面

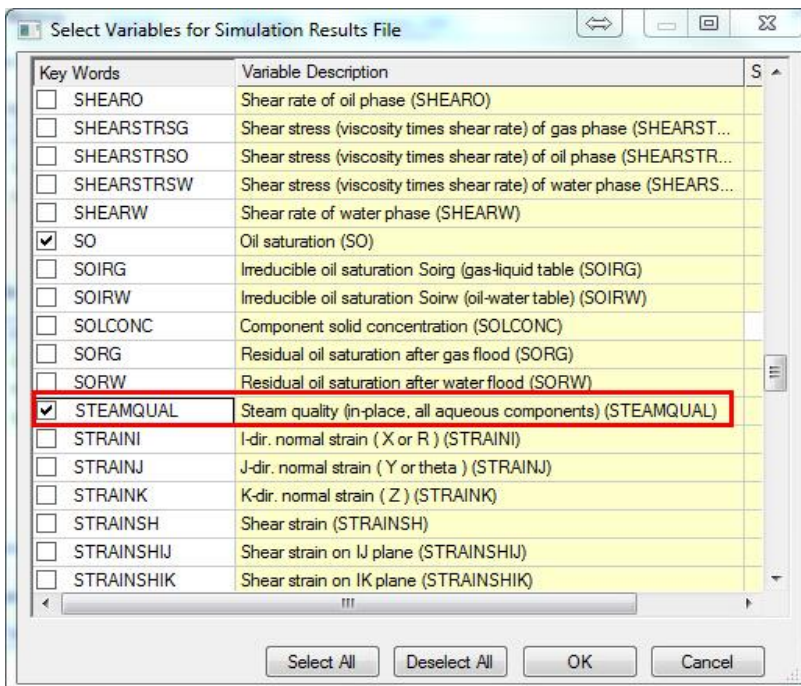


图 15 打开参数输出控制界面

对应在*.dat 文件中的写法为：

```
*OUTSRF *GRID *STEAMQUAL
```

STEAMQUAL 的结果查看可以使用 Results 3D，在参数下拉菜单中选择 In-Situ Steam Quality，如图 16 所示。也可以使用 Results Graph 画出某网格的 STEAMQUAL 随时间变化的曲线。

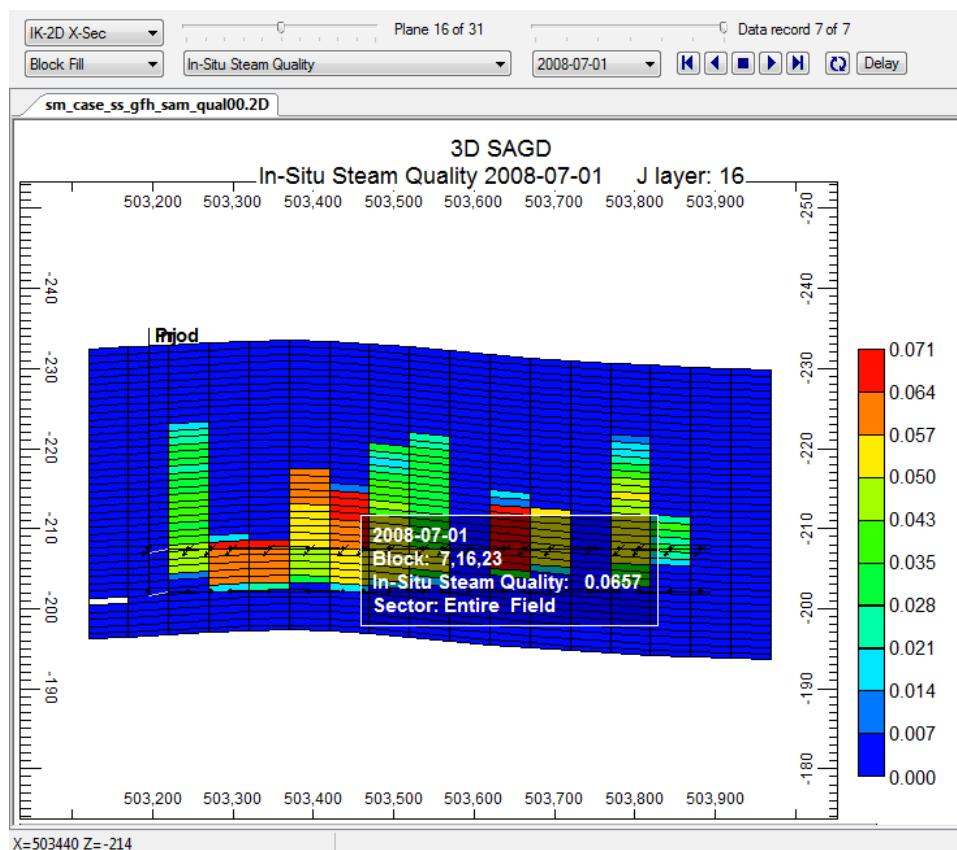


图 16 在 Results 3D 中显示的 STEAMQUAL 剖面

除了上面介绍的通过 SR2 文件输出的干度以外，使用 SAM 半解析井筒热损失计算时还可以通过*.out 文件输出井筒内不同位置处的流动干度，详细参考第 19 期讲义。

4 应用案例：灵活井井筒内蒸汽干度的输出

使用灵活井模型时，可以用*OUTSRF *FLEXLAYER 输出灵活井井筒内的属性随距离的变化参数。这里的“距离”是指相对参考位置的井筒长度。由于灵活井的网格不是地质模型网格的一部分，因此灵活井井筒内的参数不能用*OUTSRF *GRID 和*WSRF *GRID 控制输出并显示在 Results 3D 中。

为了输出灵活井井筒内的参数，把灵活井井筒的网格处理成了源汇井射孔层。这样，就可以在 Results Graph 中通过画常规的射孔层曲线的方式得到灵活井属性随距离的变化曲线。此外，*OUTSRF *FLEXLAYER 还能将灵活井井筒内每个网格的属性随时间变化的数据输出来。

例如，下面就是一个*OUTSRF *FLEXLAYER 的应用案例。

```
*OUTSRF *FLEXLAYER *STMQUAL
```

加上这个输出后，在 Results Graph 中通过 Edit → Curve → Add Property Vs. Distance...对话框画出某个管柱内在不同位置处的流动干度变化曲线，见图 17 和图 18。

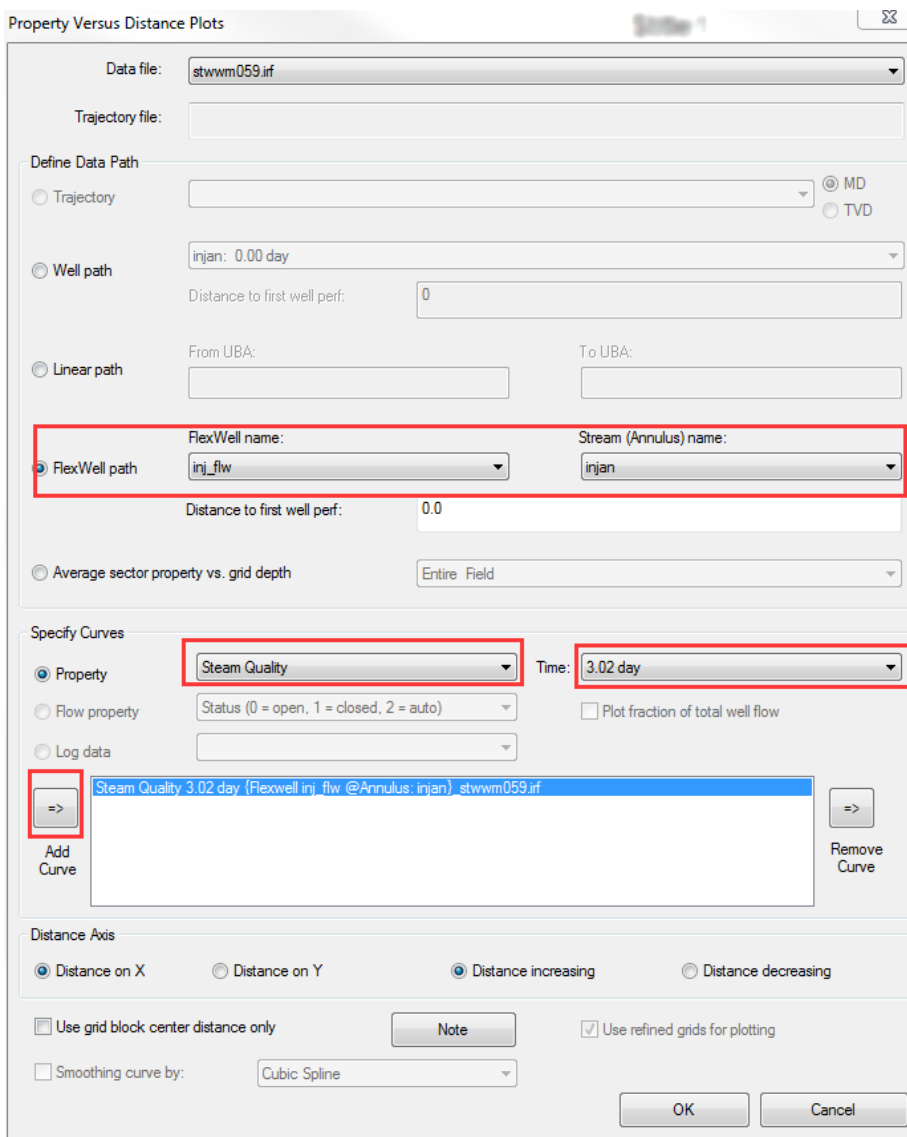


图 17 在 Results Graph 中画灵活井井筒内不同位置处的 STMQUAL

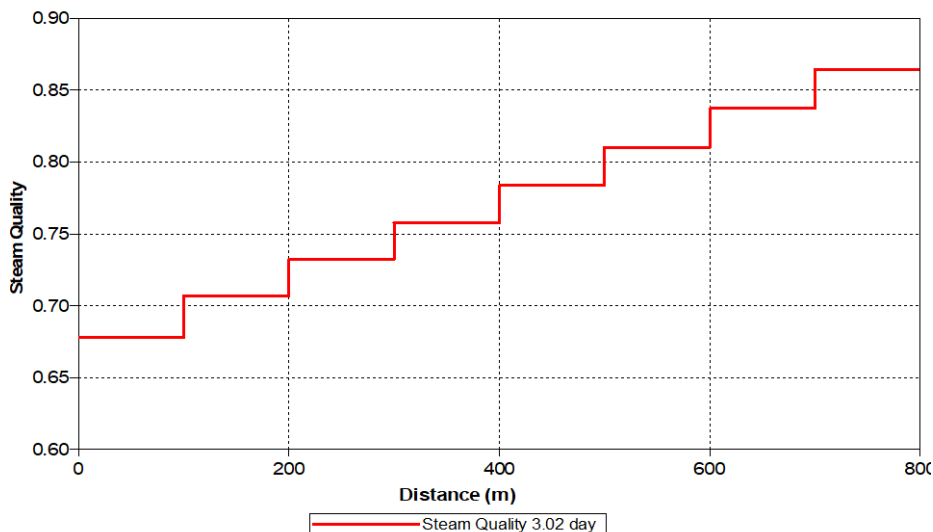


图 18 在 Results Graph 中画出的灵活井环空内不同位置处的流动干度（阶梯曲线）

图 18 中的距离是指井筒内每个网格的中心到参考位置的距离。一般参考位置就是第 1 个射孔点所在网格的中心。Results Graph 将这些网格点用线连起来就成了不同位置的干度曲线。连接的线一般用的是水平直线，表示这个数值用于整个网格体积，因此呈现出阶梯形的效果。也可以将相邻的网格点用平滑的曲线连接起来，需要在图 17 中选择底部的“Use grid block centre distance only”复选框和通过“Smoothing curve by”选择平滑类型。点击后面的“Note”按钮可以查看关于曲线平滑的详细解释。平滑后的曲线见图 19。

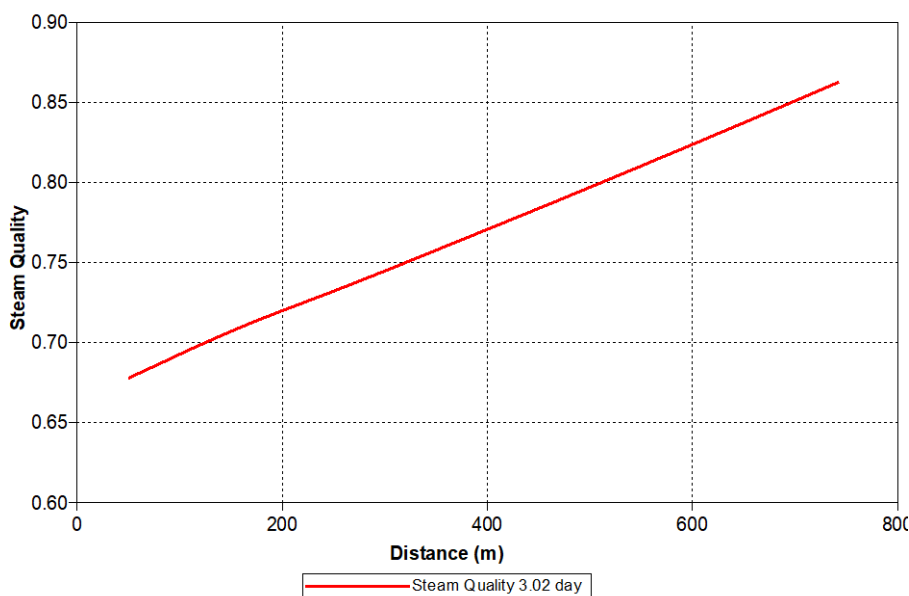


图 19 在 Results Graph 中画出的灵活井环空内不同位置处的流动干度（平滑曲线）

【完】