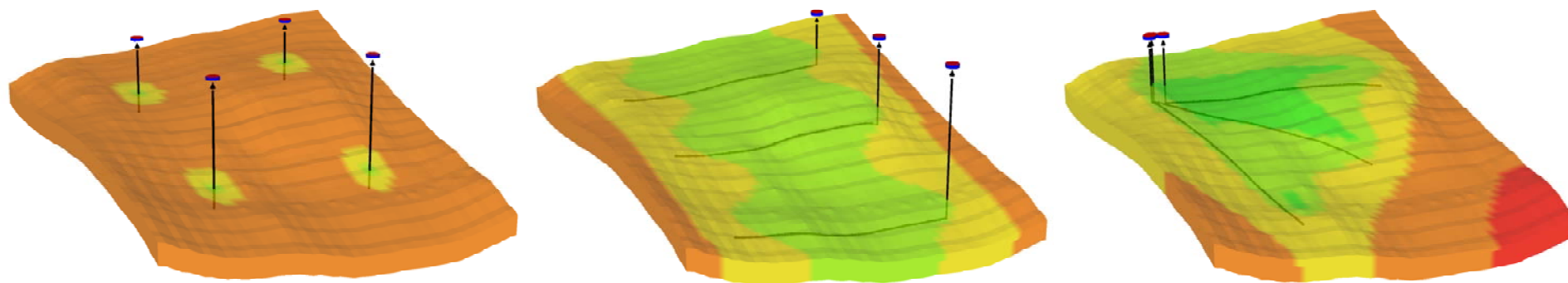




CMG煤层气数值模拟软件介绍

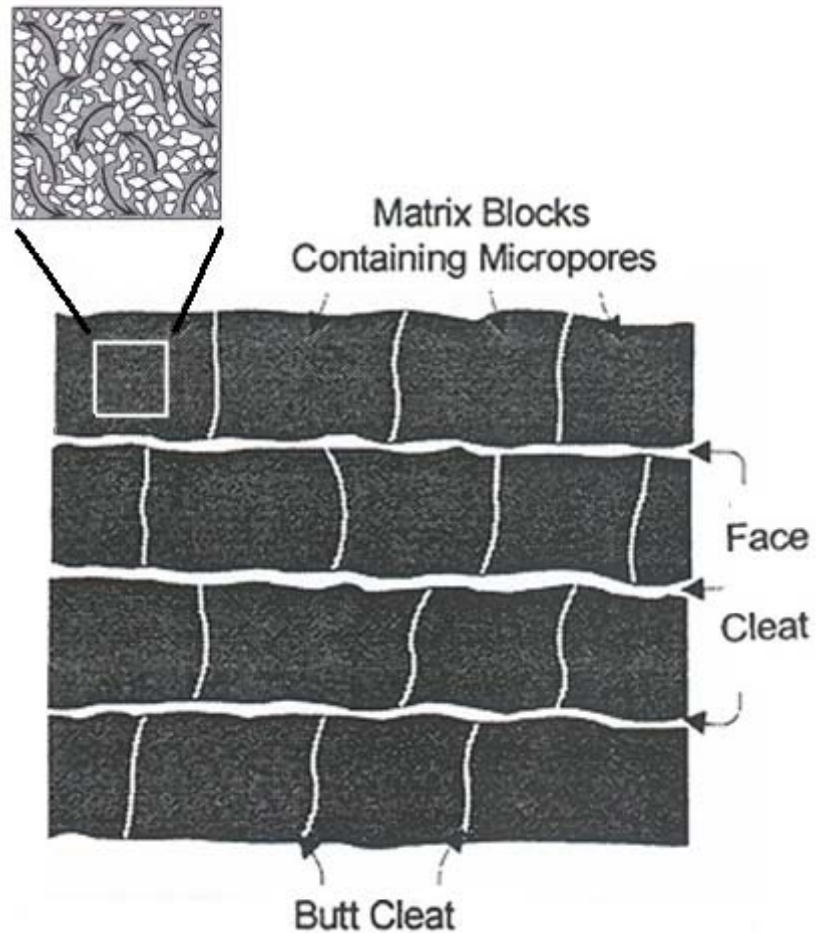


加拿大计算机模拟软件集团



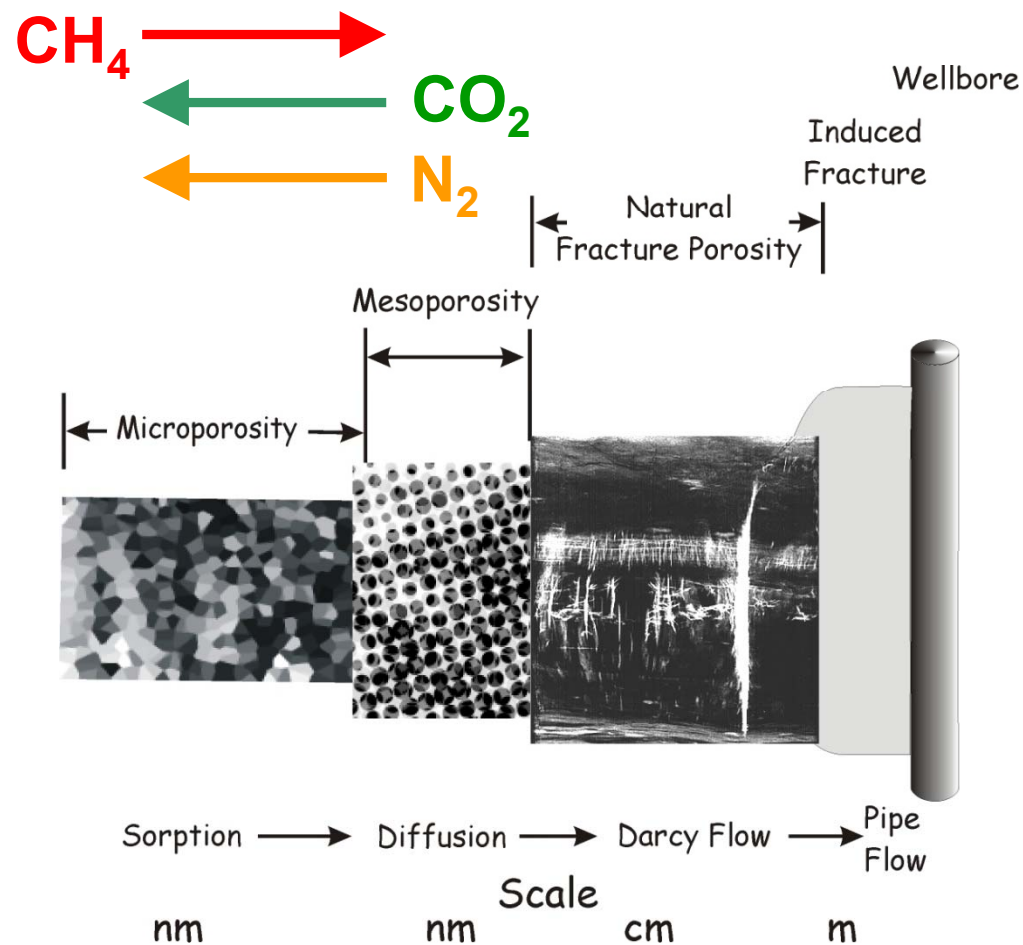
煤层气模拟的基本概念

煤层构造和煤层气流动机理



- ◆ 原生孔隙：基质
- ◆ 次生孔隙：割理（裂缝）

煤层中的流动状态



- 煤层气一次开采
- CO_2 提高采收率 (CO_2 -ECBM)
- N_2 提高采收率 (N_2 -ECBM)
- 烟道气提高采收率

煤层气一次开采机理

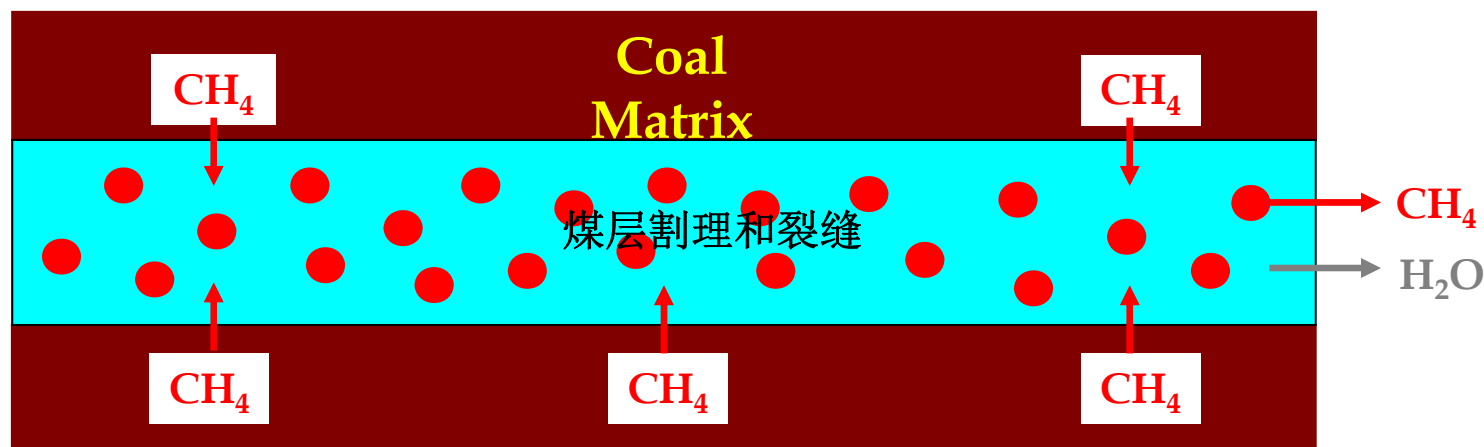
- 通过排水降低割理压力
- 煤层气从基质中解吸附出来，扩散到节理/裂缝当中
- 煤层气和水流动到井筒

在裂缝中为达西流动

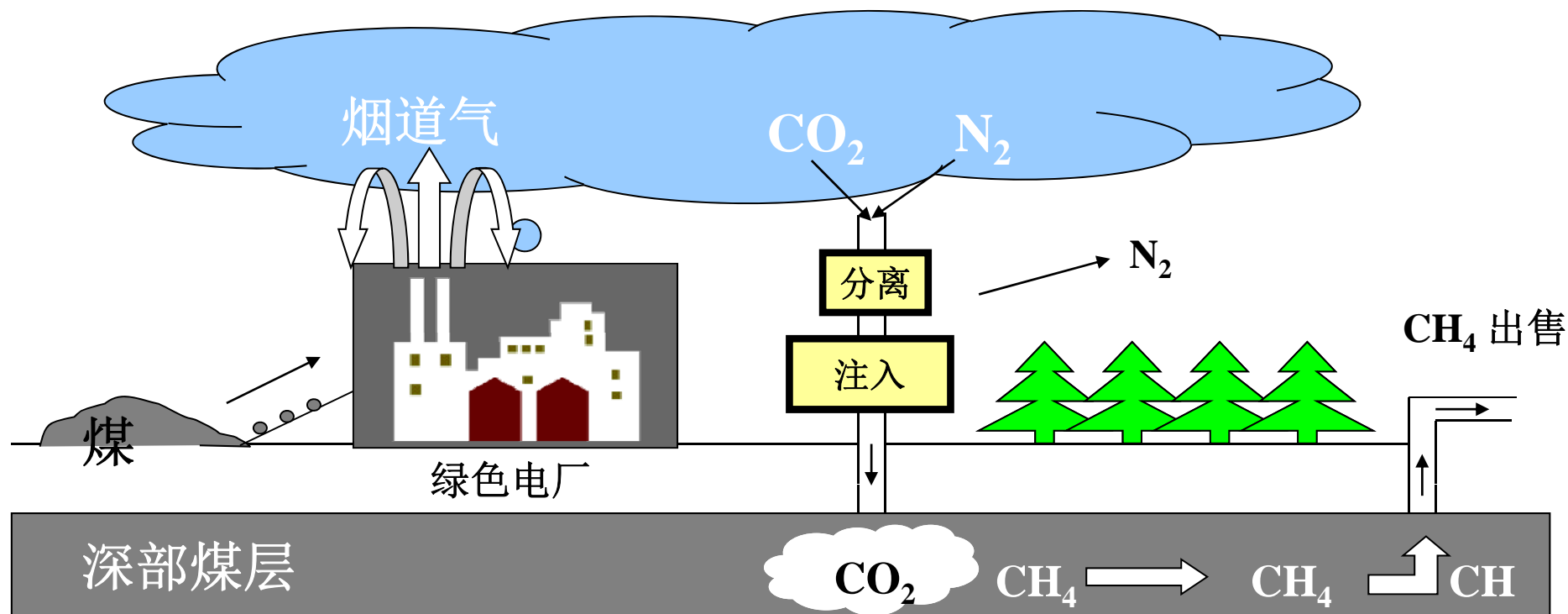
- 面割理和端割理
- 面割理和端割理的垂直连接部分
- ◆ 在大型裂缝中的达西流动或者管流
 - 大型节理
 - 次生裂缝

z1

- ◆ 在生产油管和井筒中的管流
- 裂缝渗透率受基质影响



提高煤层气采收率机理ECBM



- 提高煤层气采收率
- 温室气体(GHG)封存

煤层属性：多重孔隙度系统

□ 原生孔隙度系统（煤层基质）

- ◆ 微孔隙度 ($< 2 \text{ nm}$)
- ◆ 中孔隙度 ($2 - 50 \text{ nm}$)+
- ◆ 非常低的流通能力：渗透率在微达西范围
- ◆ 只有扩散流动

□ 次生孔隙度系统（煤层节理）

- ◆ 宏观孔隙度 ($> 50 \text{ nm}$)
- ◆ 天然裂缝
- ◆ 更强的流通能力：渗透率在毫达西范围
- ◆ 达西流动

在GEM中煤作为多重孔隙系统

□ 需要多重孔隙度模型

- ◆ 在裂缝（割理）系统中为标准的达西流动

例如

DUALPOR

SHAPE GK

□ 裂缝间距, I,J,K

例如 **DIFRAC CON 0.2** 或 **DIFRAC ALL array**

- ◆ **MATRIX** 表示基质系统
- ◆ **FRACTURE** 表示裂缝系统
- ◆ 基质中允许非达西流动
- ◆ 煤层气从基质扩散到裂缝

（注意：如果基质渗透率被指定为**0**，那么基质到裂缝之间没有流动。）

煤层属性：渗透率各向异性

- 面割理方向为较大的渗透率来定义割理系统渗透率各向异性。

例如

PERMI MATRIX CON 0.001

PERMJ MATRIX EQUALSI

PERMK MATRIX EQUALSI

PERMI FRACTURE CON 0.8

PERMJ FRACTURE CON 4

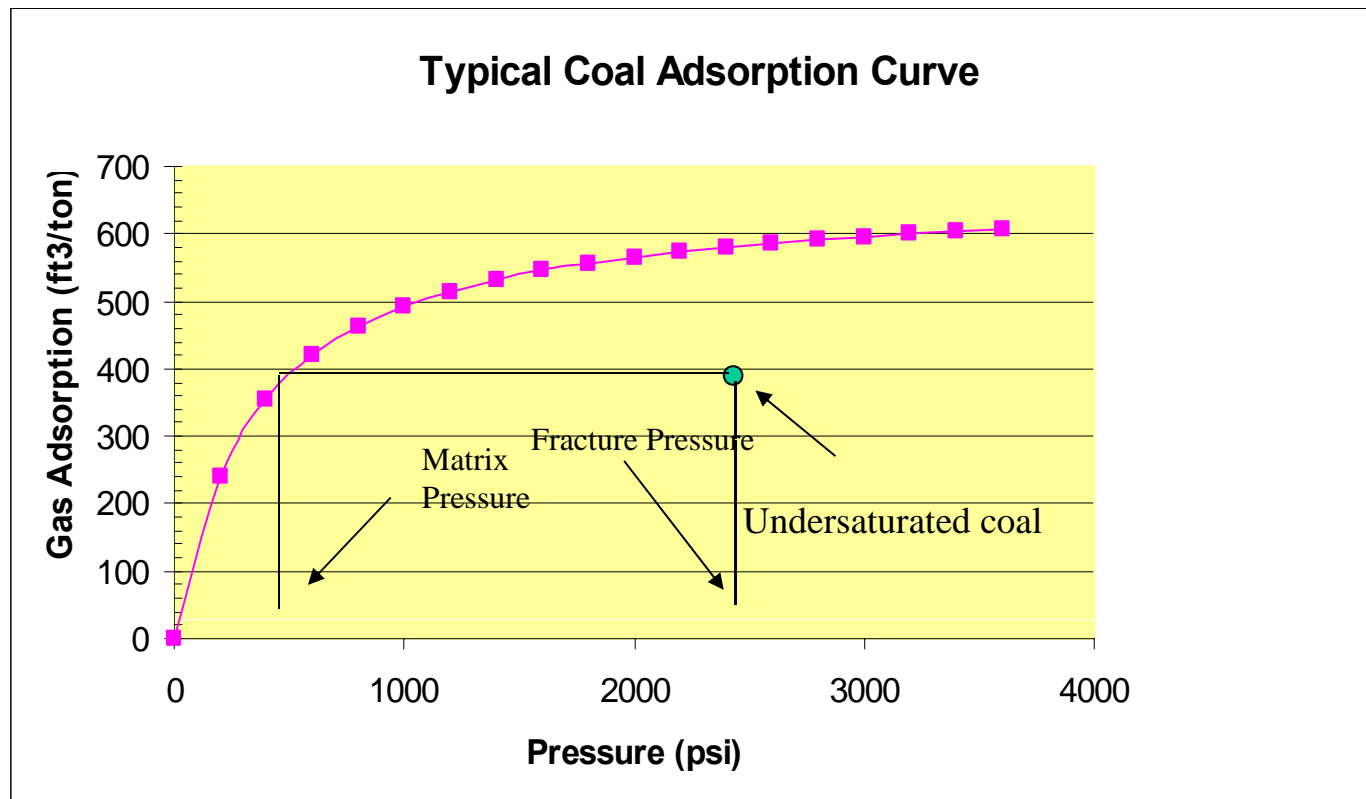
PERMK FRACTURE CON 0.4

煤层气吸附模拟

- 气体的吸附量随着压力增加非线性增大，同时随压力降低而减小。这由等温吸附线描述。
- 如果油藏温度和压力是已知的，那么可以通过等温线来估计煤层气在煤层中吸附的最大值，以及在什么压力下解吸附开始。
- 煤层吸附气体的含量是煤的等级、灰分含量、水分含量和煤层压力影响的函数。

吸附定义

□ 等温吸附曲线 (Langmuir类型)



□ 单组分吸附:

- ◆ 需要Langmuir体积, V_L (例如最大吸附气量)
- ◆ Langmuir压力, P_L (表示在什么压力下气体存储量等于最大存储量(V_L)的一半)。

$$\omega_i = \left(\frac{V_L P}{P_L + P} \right)$$

其中,

ω_i = 单位质量岩石中的吸附气摩尔量

GEM: 吸附定义

□ 多组分吸附模型:

◆ 扩展的Langmuir模型

$$\omega_i = \omega_{i,\max} \left(\frac{(y_{ig} p / p_{Li})}{1 + \sum_j (y_{jg} p / p_{Lj})} \right)$$

其中,

y_{ig} = 气相中吸附组分的摩尔分数

- ◆ 基于单组份的Langmuir等温线
- ◆ 提供多组分扩展

GEM中吸附关键字

Langmuir 等温线关键字:

- ❑ **ADGCSTC-** Langmuir等温线的压力参数 的倒数($1/P_L$)
 - ◆ 1/kpa or 1/psi
- ❑ **ADGMAXC-** 指定单位质量岩石吸附组分的最大摩尔量 (V_L)
 - ◆ gmole of gas/kg of rock or gmole/lb of rock
 - ◆ （注意右侧单位！）
- ❑ ***ROCKDEN** : 煤层密度（除孔隙外的实际岩石密度）
 - ◆ Kg/m³ or lb/ft³
- ❑ 这些关键字在模型的**ROCK-FLUID**部分定义。

GEM中吸附关键字

例如

**\$ Property: Maximal Adsorbed Mass(CH4) (gmole/kg) Max: 0 Min: 0
ADGMAXC 'CH4' FRACTURE CON 0

**\$ Property: Maximal Adsorbed Mass(CO2) (gmole/kg) Max: 0 Min: 0
ADGMAXC 'CO2' FRACTURE CON 0

**\$ Property: Maximal Adsorbed Mass(CH4) (gmole/kg) Max: 0.734287 Min: 0
ADGMAXC 'CH4' MATRIX CON 0.734287

**\$ Property: Maximal Adsorbed Mass(CO2) (gmole/kg) Max: 1.04824 Min: 0
ADGMAXC 'CO2' MATRIX CON 1.04824

**\$ Property: Langmuir Adsorption Constant(CH4) (1/kPa) Max: 0.000303306 Min: 0.000303306
ADGCSTC 'CH4' MATRIX CON 0.000303306

**\$ Property: Langmuir Adsorption Constant(CH4) (1/kPa) Max: 0 Min: 0
ADGCSTC 'CH4' FRACTURE CON 0

**\$ Property: Langmuir Adsorption Constant(CO2) (1/kPa) Max: 0.000809717 Min: 0.000809717
ADGCSTC 'CO2' MATRIX CON 0.000809717

**\$ Property: Langmuir Adsorption Constant(CO2) (1/kPa) Max: 0 Min: 0
ADGCSTC 'CO2' FRACTURE CON 0

*

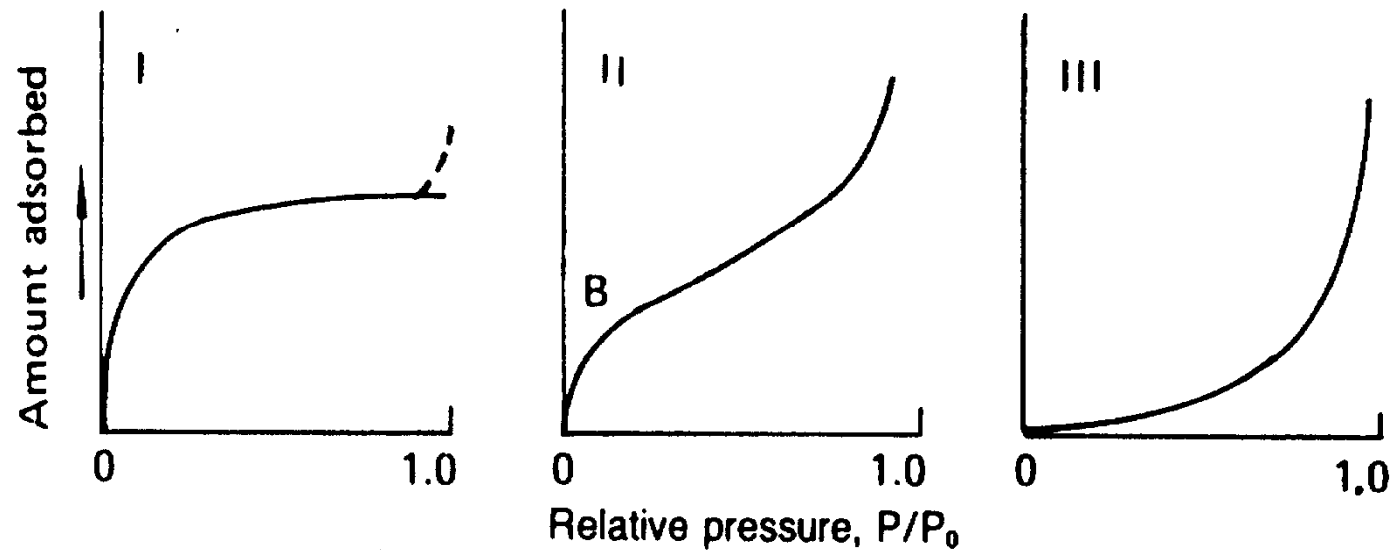
*\$ Property: Rock Density (kg/m3) Max: 1327 Min: 1327
ROCKDEN MATRIX CON 1327

每个网格的这些关键字必须常数或者数组。

GEM: 其他可用的吸附模型

□ 其他复杂吸附模型选项

- ◆ 其它复杂系统可利用表格输入



GEM: 其他可用的吸附模型

□ 吸附作用数据表格输入的语法

***ADSORBTMAX** ‘组分’ ϖ_{\max}

其中,

ϖ_{\max} 表示岩石对某组分的最大吸附值, 单位是 **gmole/kg**(或者 **lb**)

***ADSTAB** ‘组分’

****** (组分分压, **kpa/psia**) (组分吸附量)

$$\begin{array}{cc} \bar{p}_1 & \varpi_1 \\ \bar{p}_2 & \varpi_2 \\ \dots & \dots \\ \bar{p}_n & \varpi_n \end{array}$$

□ 在多组分系统, 可以将这个表格扩展到每种组分。

气体在煤层基质中流动

扩散

GEM: 扩散模拟

□ 两种类型的模型:

1. 煤层自由扩散: 模拟煤层基质到裂缝的扩散, 遵循 **Ficks law** :

$$Q = \text{vol} * [\text{shape} * \text{diffus}(K)] * F(S_g) * [C(k, m) - C(k, f)]$$

Vol = 单元体积

Diffus(k)=扩散值

F(S_g)=模拟水堵的裂缝含气饱和度函数

C(k,m)= 基质中物质**k**在自由气相的质量浓度

C(k,f)= 裂缝中物质**k**在自由气相的质量浓度

GEM: 扩散模拟

2. 煤层朗格缪尔扩散:

$$Q = \text{vol} * [\text{shape} * \text{diffus}(K)] * F(S_g) * [\text{Lang}(k, m) - \text{Lang}(k, f)]$$

Vol = 晶粒体积

Diffus(k) = 扩散值

F(S_g) = 水堵裂缝气体饱和度函数

Lang(k,m) = 基质中扩展的煤层朗格缪尔等温线

Lang(k,f) = 裂缝中扩展的煤层朗格缪尔等温线

GEM: 扩散模拟

- 输入煤层扩散时间 (COAL-DIF-TIME)
 - ◆ 直接使用测量到的解吸附时间
 - 受组分影响
 - ◆ 内部计算扩散流动
- 直接输入气相扩散值 (COAL-DIF-COMP)
 - ◆ 输入扩散常数 (cm^2/sec)
 - ◆ 输入估算的煤层节理（裂缝）间距
 - 形状因子 (**Shape Factor**)
 - ◆ 流动取决于这两个参数的影响

GEM: 扩散模拟

□ 直接输入气相扩散值

- ◆ 为每个组分指定 {DiffCoeff_i}
- ◆ 指定裂缝间距: DFrac_i, DFrac_j, DFrac_k
- ◆ 这些决定着下面的形状因子:

$$Shape = 4 \sum_i \frac{1}{(DFrac_i)^2}$$

- ◆ 定义煤块与裂缝之间的扩散
 - 扩散常数 = **Shape × DiffCoeff_i**

煤层渗透率随时间的变化

在注入阶段和生产阶段 煤层渗透率的变化

- 在煤层气井开采阶段，渗透率的变化是十分巨大的：在圣胡安盆地报道超过**100**倍。
- 在**ECBM**时，渗透率的变化更加的强烈，这是因为组分随着煤层特有的膨胀和收缩性质而发生变化。
- 渗透率变化的解析模型可以有效地提供合理的与现场数据相比较的结果。

煤层渗透率变化的解析模型

- **ARI model (Pekot and Reeves, 2003)**
- **Palmer and Mansoori (P&M, 1996, 1998)**
- **Shi and Durucan (S&D, 2003, 2005)**
- **Cui and Bustin (2005, 2007)**
- **ARC model ; extension of P&M model (Mavor & Gunter, 2004, 2005)**
- **Improved P&M model (2008)**

GEM: 基质的膨胀和收缩

- 什么时候气/水开始产出?
 - ◆ 裂缝压力降低, 改变有效应力
 - ◆ 裂缝闭合, 降低渗透率
- 煤层气解吸附
 - ◆ 引起基质收缩
 - ◆ 裂缝张开, 增大渗透率
- 注入其他气体
 - ◆ 引起基质膨胀
- 多种相互矛盾影响同时出现

GEM: 基质的膨胀和收缩

□ GEM可以模拟膨胀/收缩 过程:

◆ 利用“压缩/膨胀”选项

- 压力函数-**Palmer & Mansoori**
- 用户根据压力相关的孔隙度和渗透率倍数来导入列表数据


GEM: 基质的膨胀和收缩

□ Palmer-Mansoori 模型

◆ 采用有关岩石力学的基础模型

- Initial pressure (p_{init}) and porosity (ϕ_{init})
- Young's modulus (E) and Poisson's Ratio (ν)
- Max strain at inf pres (ϵ_L) and half-strain pressure (p_ϵ)
(amounting to a Langmuir-type model for strain)

$$\frac{\phi}{\phi_{init}} = 1 + c_f(p - p_{init}) + \frac{\epsilon_L}{\phi_{init}} \left(1 - \frac{K}{M} \right) \left(\frac{p_{init}}{p_\epsilon + p_{init}} - \frac{p}{p_\epsilon + p} \right)$$



Function of ν and $1/(E\phi_{init})$

Bulk and axial modulus Function of ν

GEM: 基质的膨胀和收缩

□ Palmer-Mansoori 模型

The ratio of bulk to axial modulus is related to the Poisson's ratio as indicated by:

$$\frac{K}{M} = \frac{1}{3} \frac{(1+\nu)}{(1-\nu)}$$

where, ν is the Poisson's ratio

The pore volume compressibility values can be entered directly using the

*CCPOR keyword or calculated from entered parameters as follows:

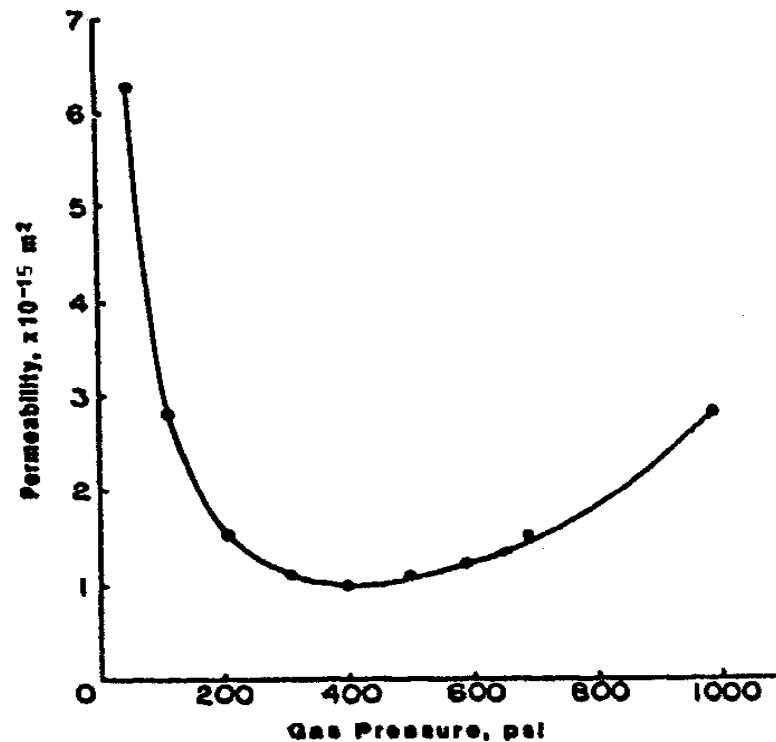
$$M = E \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}; \text{ where } E \text{ is the Young's Modulus and}$$

$$c_f = \frac{1}{\phi_i M}$$

GEM: 基质的膨胀和收缩

□ 典型煤层气裂缝渗透率图表

◆ Using $(k/k_{init}) = (\phi / \phi_{init})^{pwr}$



GEM: 基质的膨胀和收缩

□ 多组分Palmer/Mansoori 模型:

- ◆ 问题: 注入 CO_2 导致基质膨胀
 - 由于 CH_4 的解吸附, 膨胀效果相对压缩更强烈
 - 预计并可能严重失去注入吸收能力
- ◆ 需要由组分决定P&M 参数
 - 改进输入一个“平均”参数的设置
 - 指定由组分决定的 ϵ_L 和 p_ϵ

GEM: 基质的膨胀和收缩

□ 多组分 Palmer/Mansoori 模型:

- ◆ Max strain at inf pres (ε_L) and half-strain pressure (p_ε) component dependent

$$\frac{\phi}{\phi_{\text{init}}} = 1 + c_f(p - p_{\text{init}}) + \frac{1}{\phi_{\text{init}}} \left(1 - \frac{K}{M} \right) \left(\sum_{j=1}^{nc} \frac{p_{\text{init}} \varepsilon_{Lj} (y_{\text{init},j} / p_{\varepsilon j})}{1 + p_{\text{init}} \sum_{k=1}^{nc} (y_{\text{init},k} / p_{\varepsilon k})} - \sum_{j=1}^{nc} \frac{p \varepsilon_{Lj} (y_j / p_{\varepsilon j})}{1 + p \sum_{k=1}^{nc} (y_k / p_{\varepsilon k})} \right)$$

P&M 模型的关键字

➤ CROCKTYPE 定义为激活P&M模型

- ◆ P&M模型的压力应变需要裂缝的压缩系数(C_f)和相应的参考压力。
- ◆ 压缩系数是由输入的YM，泊松率和初始孔隙度估算出来的。如果没有输入关键字CCPOR 则使用P&M 相关性。
- ◆ 例如如果没有指定关键字CCPOR，而采用了计算的压缩系数的计算，那么P&M 模型的相关性（?）。

水层的压缩系数

- **CROCKTYPE**只用于油藏网格
- 当模型使用解析水体时，其压缩系数由**CPOR**和**PRPOR**定义。

P&M 模型的关键字

实例1: **CCPOR**是未指定的，压缩系数由输入的**P&M**岩石参数估算出来。

*CPOR FRACTURE 3.5e-5

*PRPOR FRACTURE 101.3

*CPOR MATRIX 3.5e-5

*PRPOR MATRIX 101.3

Used by analytical aquifers

CROCKTYPE1

CPRPOR FRACTURE 101.3

POISSR 0.3

YOUNGM 5E6

STRINF 0.0098

PRESLN 4700

EXPPM 3

Used by reservoir grid blocks.

CROCKTYPE 2

CPRPOR MATRIX 101.3

CCPOR MATRIX 3.5E-5

CTYPE FRACTURE CON 1

CTYPE MATRIX CON 2

P&M 模型的关键字

实例2: 压缩系数的指定值用在P&M相关性。

*CPOR FRACTURE 3.5e-5

*PRPOR FRACTURE 101.3

*CPOR MATRIX 3.5e-5

*PRPOR MATRIX 101.3

Used by analytical aquifers

CROCKTYPE1

CCPOR FRACTURE 3.5E-5

CPRPOR FRACTURE 101.3

POISSR 0.3

YOUNGM 5E6

STRINF 0.0098

PRESLN 4700

EXPPM 3

Used by reservoir grid blocks.

CROCKTYPE 2

CPRPOR MATRIX 101.3

CCPOR MATRIX 3.5E-5

CTYPE FRACTURE CON 1

CTYPE MATRIX CON 2

渗透率变化的现场试验

- 已经在两个盆地证实渗透率随着CBM井的开采而逐渐增大
 - ◆ 第一个是圣胡安盆地（Fruitland煤层），其渗透率增大已经被报道。
 - ◆ 第二个是Raton盆地，在高渗透率井有渗透率增大现象，而在低渗透率井没有这一现象。

渗透率变化的现场试验

□ 随着开采，渗透率呈指数增大。

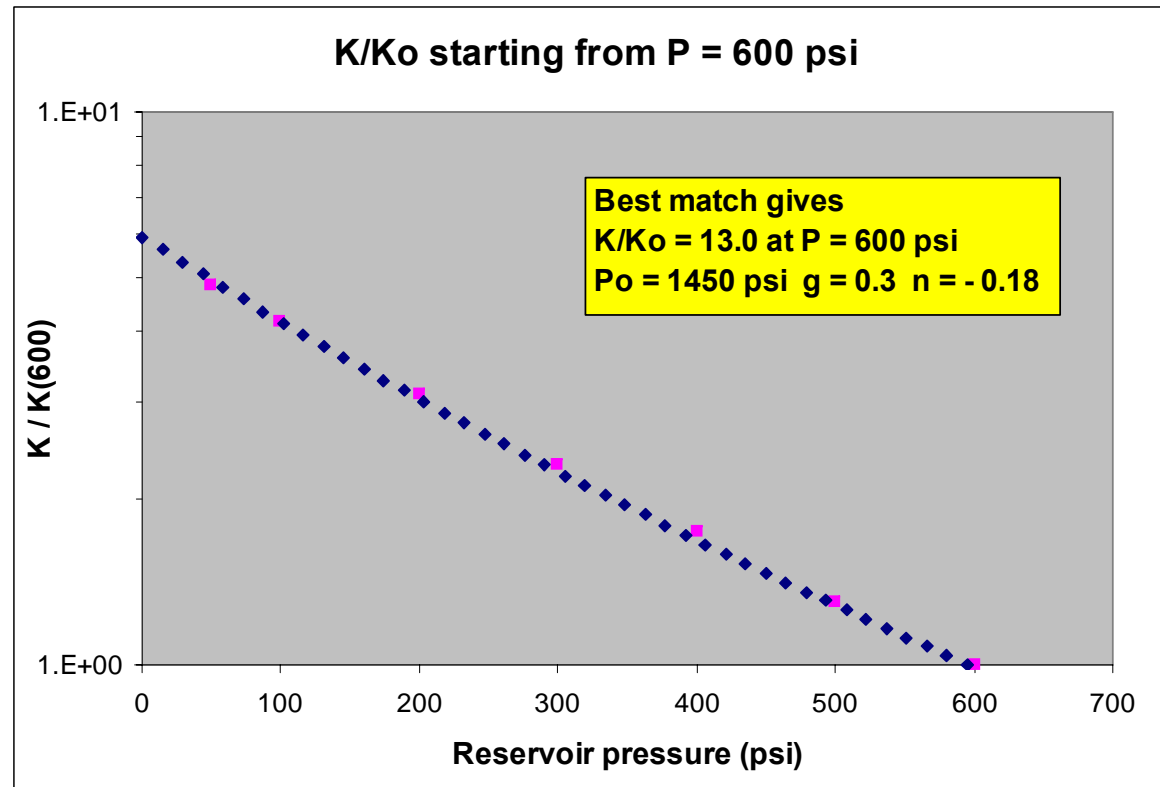


Figure : Data from Clarkson and McGovern (2003) in the San Juan fairway (pink square dots), and best match by improved P&M model.

渗透率变化的现场试验

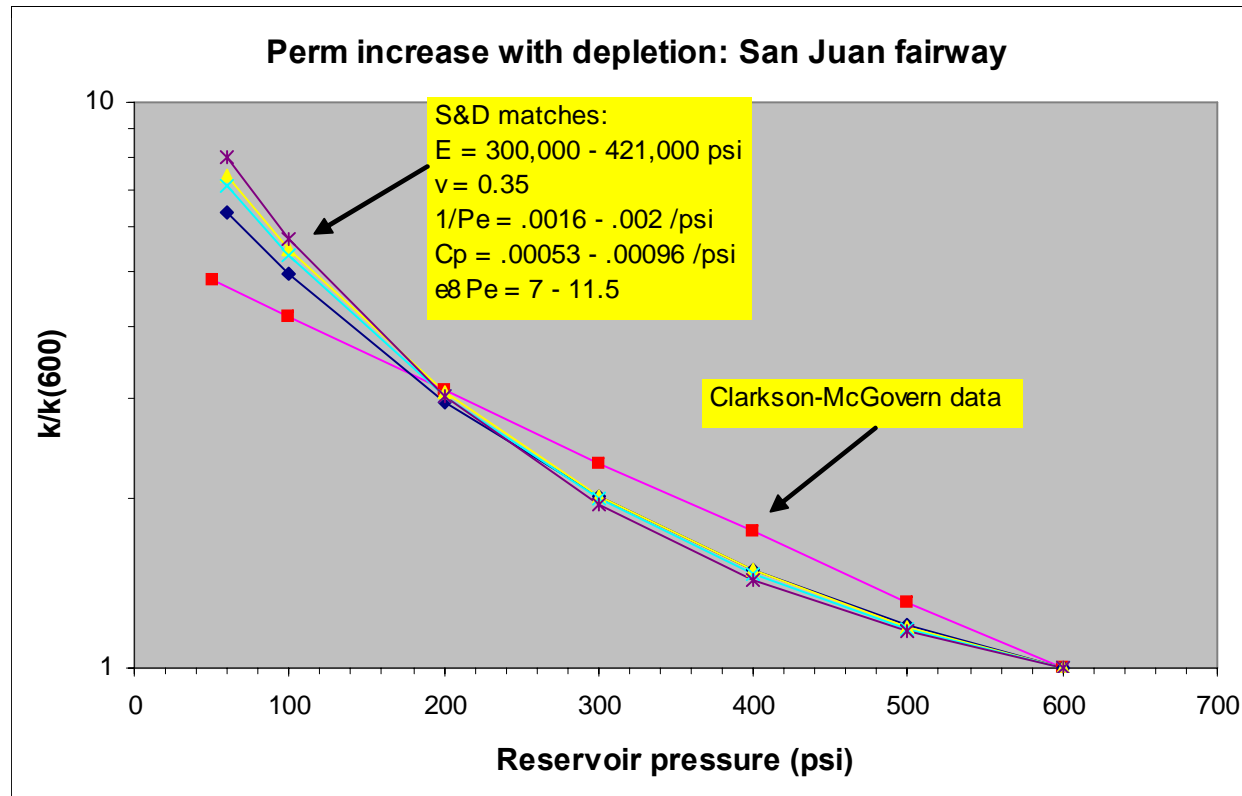


Figure: Data from Clarkson and McGovern (2003) in the San Juan fairway (red square dots), and best matches by S&D model.

渗透率变化的现场试验

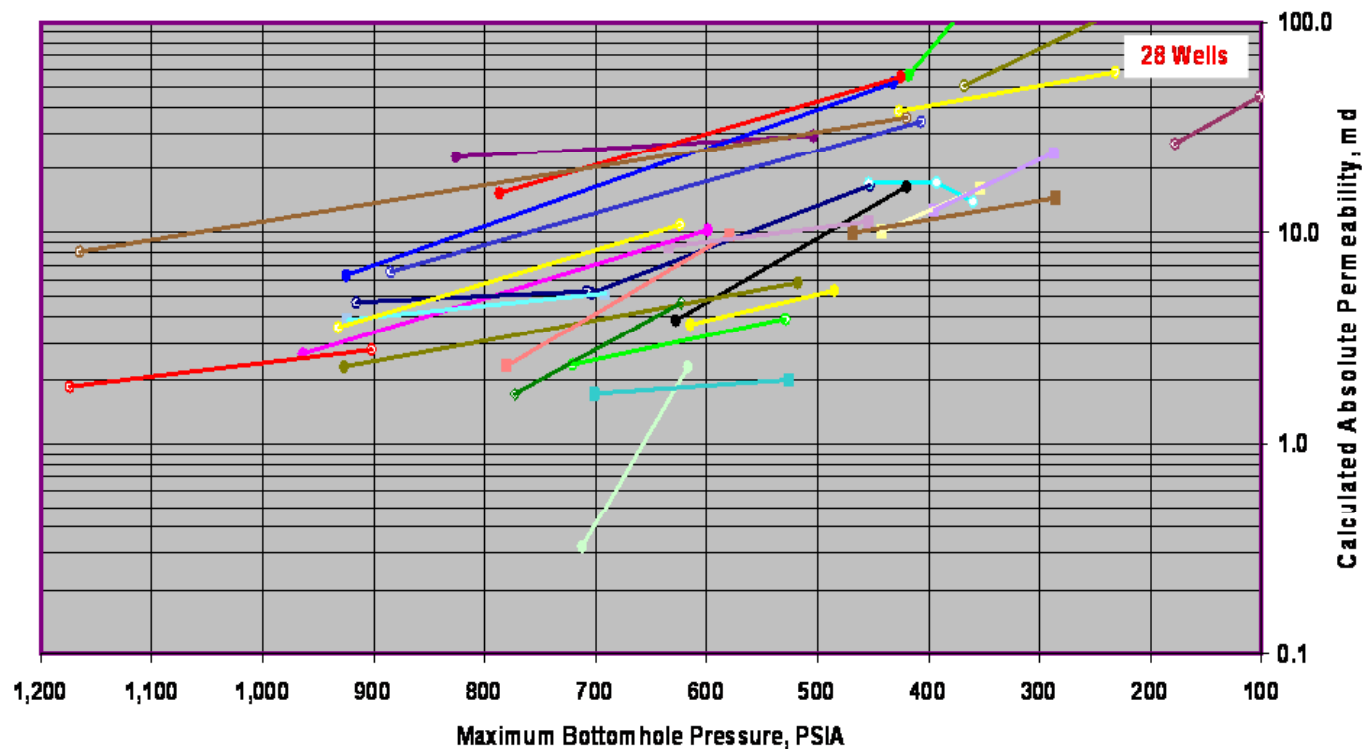


Figure : Absolute permeability versus reservoir depletion: 28 infill wells NE of San Juan fairway, each with two measurements (Gierhart *et al.*, 2007).

初始化方法

初始化方法

Select reservoir initialization option

Select how you want to determine initial conditions in the reservoir. All options are okay for "Quick" method

- ☒ Use *USER_INPUT scheme. Input initial reservoir pressure, and global composition.
- ☐ Use *VERTICAL *BLOCK_CENTER *COMP scheme. Create at least two initialization regions (*ITYPE): one for FRACTURE and one for MATRIX. Input reference pressure and depth and composition vs. depth table.
- ☐ Use *VERTICAL *BLOCK_CENTER *WATER_GAS scheme. Create at least two initialization regions (*ITYPE): one for FRACTURE and one for MATRIX. Input reference pressure and depth and gas composition for each initialization region.
- ☐ Use *VERTICAL *DEPTH_AVE *WATER_GAS scheme. Create at least two initialization regions (*ITYPE): one for FRACTURE and one for MATRIX. Input reference pressure and depth and gas composition for each initialization region.

< Back Next > Cancel Help

初始化：用户导入

```
|
INITIAL

USER_INPUT

SEPARATOR
**$ Stage Pres. Stage Temp.
      101.325      15.5556
**$ Property: Pressure (kPa) Max: 10499.9 Min: 10499.9
PRES MATRIX CON      10499.9
**$ Property: Pressure (kPa) Max: 12000 Min: 12000
PRES FRACTURE CON      12000
**$ Property: Water Saturation Max: 0.999 Min: 0.999
SW FRACTURE CON      0.999
**$ Property: Water Saturation Max: 0.0001 Min: 0.0001
SW MATRIX CON      0.0001
**$ Property: Global Composition(CO2) Max: 0 Min: 0
ZGLOBALC 'CO2' MATRIX CON      0
**$ Property: Global Composition(CH4) Max: 1 Min: 1
ZGLOBALC 'CH4' MATRIX CON      1
**$ Property: Global Composition(CH4) Max: 1 Min: 1
ZGLOBALC 'CH4' FRACTURE CON      1
**$ Property: Global Composition(CO2) Max: 0 Min: 0
ZGLOBALC 'CO2' FRACTURE CON      0
```

初始化: VERTICAL_DEPTH_AVE WATER_GAS

INITIAL

VERTICAL DEPTH_AVE WATER_GAS NOEQUIL NOTRANZONE

NREGIONS 2

ZGAS

0.0 1

0.0 1

REFPRES

10499.9 12000

REFDEPTH

1075 1075

DWGC

1050 1050

SWOC

0.0001 0.9999

SEPARATOR

***\$ Stage Pres. Stage Temp.
101.325 15.5556

GASZONE NOOIL

***\$ Property: Initialization Region Type Max: 1 Min: 1

ITYPE MATRIX CON 1

***\$ Property: Initialization Region Type Max: 2 Min: 2

ITYPE FRACTURE CON 2

|

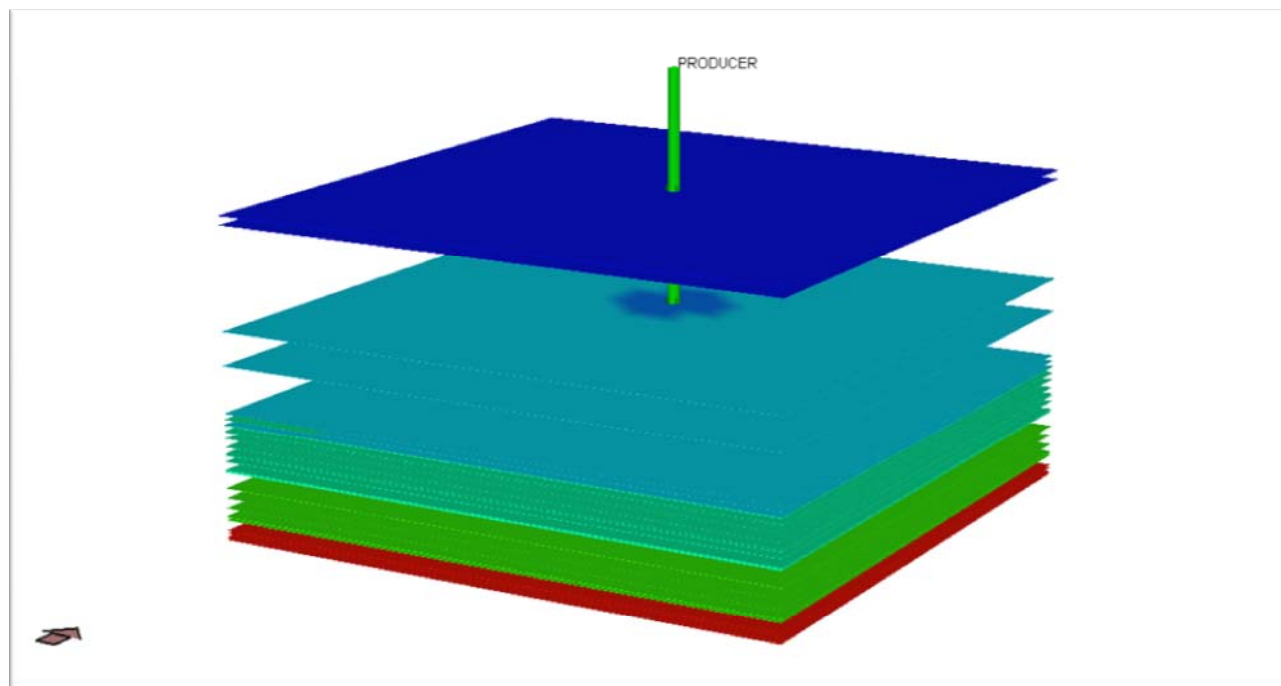
← 注意: 区域1为基质, 区域2为裂缝

用户输入vs. 重力深度平衡初始化

- ❑ 无论哪一种初始化，都要保证系统是平衡的。
- ❑ 用户输入恒压初始化时一定要仔细。
- ❑ 在简单的单一层或者多个分离煤层的箱式模型（无倾角）中，推荐使用恒压输入。
- ❑ 如果油藏是倾斜的，那么GEM会基于重力和平衡计算调整压力。
- ❑ 由于压力的改变，可能会无意地改变吸附气的含量。

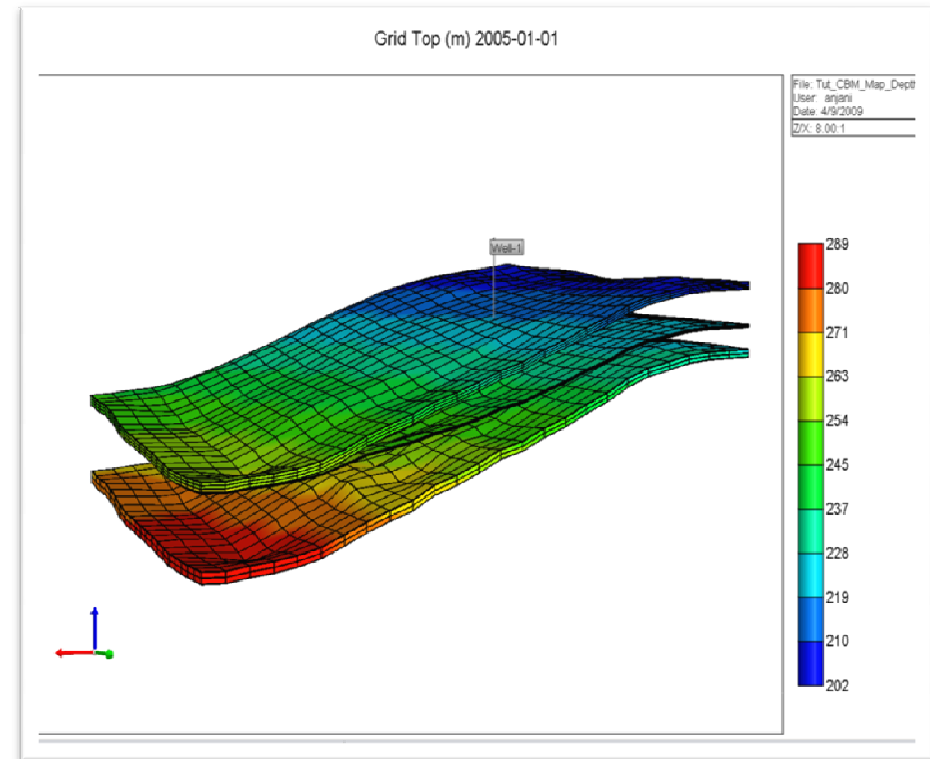
用户输入vs. 重力深度平衡初始化

- 例如，下面的油藏模型使用用户输入就非常好：煤层的平面图每层都不相连，可以为每层定义一个恒压。



用户输入vs. 重力深度平衡初始化

- ❑ 倾斜油藏推荐使用重力深度平衡初始化。
- ❑ Gem 会做一个密度与毛孔压力（若有的话）平衡计算并计算每个网格的压力。
- ❑ 计算出来的压力基于每个网格的等温线来计算每个网格的吸附气含量。



在这个实例中，如果每个网格的压力通过核算重力作用已经被计算出来的话，用户同样可以“用户导入”初始化。在这些实例中，压力矩阵可以通过用户导入方法指定。

高级的多组分等温线选项与用户 输入初始化组合

快速CBM向导中的高级多组分等温线选项

Select region type

☒ Use "Quick" method. One Langmuir curve for each component for the entire reservoir. Most of the parameters including rock density, matrix porosity, etc. suggested and filled in by Builder

☐ Use multiple regions. A region could be a sector, layer, etc. Enter a Langmuir curve for each region for each component. Use constant compressibility (*CPOR and *PRPOR) for all regions.

Create/Edit Sectors...

☐ Use multiple regions defined by rock compressibility specified by *CROCKTYPE (Compaction/dilation rocktype). Also may want to enter Palmer and Mansoori parameters. Enter a Langmuir curve for each rock type for each component

Create/Edit Compaction Regions... Set CTYPE Array...

☐ Use multiple relative permeability regions (*RTYPE keyword) and associated rock compressibility (*CROCK). Enter a Langmuir curve for each rock type for each component

Set RTYPE Array...

< Back Next > Cancel Help

多组分等温线： 网格水平的等温线

- 根据现有数据，你可以利用前面提到的两种等温线选项中的任意一个。
- 可以进一步利用地质统计学（或朗格缪尔参数图）并创建一个朗格缪尔参数分布。
- 这会在个别网格创建等温线。
- 快速**CBM**向导无法用于此用途。

多组分等温线：朗格缪尔参数的计算

- 在**Builder**中，需要计算朗格缪尔参数(**ADGMAXC** 和 **ADGCSTC**)并导入成一系列属性。
- 在**Builder**中，输入 P_L 为用户自定义临时属性。
- 构建一个公式 $1/P_L$ 并指定为 **ADGCSTC (1/kpa or 1/psia)**。
- 在**Builder**中输入 V_L 为用户自定义临时属性。
- 由于导入的**ADGMAXC**单位是 **gmole/kg** 或**lb** 或岩石单位，所以需要做一些手动计算。

多组分等温线：朗格缪尔参数的计算

- 根据标况下理想气体方程（标准温度和压力），可以将气体含量转换到摩尔单位。

通用气体常数， $R = 82.05 \text{ cm}^3\cdot\text{atm}/\text{gmole}\cdot\text{K}$

摩尔体积 = RT/P (cm^3/gmole)

其中， T = 温度 (K)

P = 压力 (atm)

$\text{ADGMAXC (gmole/kg)} = V_L (\text{cm}^3/\text{kg}) / \text{摩尔体积}(\text{cm}^3/\text{gmol})$

可以使用**Builder**中的“**Formula**”选项构建公式。

多组分等温线：气体含量图的应用

- 随后，可以利用用户输入或者重力深度平衡初始化来计算压力。
- 有时，现场初始气体含量图已经获取（通过煤层数据和地质统计学的结合获得）。
- 在**GEM**中，基质压力和等温线共同影响着吸附气的流量。
- 用户可以通过气体含量图获得基质压力。

气体含量图的多组分等温线应用：初始化

- 在**Builder**中计算基质压力。
- 在**Builder**中打开气体含量图，创建每个网格的初始气体含量。
- 利用**Builder**中的朗格缪尔公式计算每个网格的基质压力。

$$P = \frac{gas\ content * P_L}{V_L - gas\ content}$$

P.S. 注意单位

气体含量图的多组分等温线应用：初始化

- 计算出的压力不应该导致非平衡压力分布。如果压力非平衡分布，那么等温线和气体含量将不相互一致。
- 裂缝压力的指定将取决于煤层是否饱和或未饱和。
 - ◆ P_{matrix} is always $\leq P_{\text{fracture}}$
 - ◆ For saturated system, $P_{\text{fracture}} = P_{\text{matrix}}$
- 对于未饱和系统而言，裂缝压力应该大于基质的压力（将取决于煤层深度）。

GEM中原始含气储量计算 (GIP)



➤ Gas-In-Place 计算

- ◆ 基于体积来计算裂缝内的气储量 (游离气)
- ◆ 基于等温线来计算基质中的气储量 (吸附气)
- ◆ 总原始含气储量 **GIP** = 游离气 + 吸附气
- ◆ 初始裂缝压力 > 基质压力表示煤层未饱和
- ◆ 当排水时裂缝压力下降

GEM: 井 & 动态数据

- ❑ 在初始排水结算水的总体积/**BHP/WHP**可以作为操作约束条件
- ❑ 如果使用 **STW** 作为操作约束条件，排水阶段之后将需要改变约束条件。
- ❑ 拟合生产井的**BHP** 或 **WHP** 十分重要。
- ❑ 例如：

WELL 3 'Producer'

PRODUCER 'Producer'

OPERATE MIN BHP 50 CONT REPEAT

OPERATE MAX STW 1250 CONT REPEAT

数值调整

- 如果在运行时出现数值问题，那么我们利用全隐式选项。

***AIMSET *FRACTURE *CON 3**

***AIMSET *MATRIX *CON 3**

- 检查回流层；检查关键字**XFLOW_MODEL**的细节。
- 如果井方程收敛出现问题，尝试检查**WELLINIT ITER**关键字。

数值调整

- 如果默认的数值调整参数不能解决收敛问题，那么请尝试下面的设置（**SI**单位制）：

*DTMAX 30

*DTMIN 0.0001

*NORM SATUR 0.1

*NORM GMOLAR 0.1

*NORM PRESS 5000.0

*MAXCHANGE *SATUR 0.999

*MAXCHANGE *GMOLAR 0.999

*MAXCHANGE *PRESS 50000.0

*NORTH 100

*ITERMAX 100

*CONVERGE MAXRES LOOSER

其它GEM功能

□ GEM的许多其它可能功能

- ◆ 能够模拟气在水中的溶剂，水汽化
- ◆ 非达西流动模型
 - 改进了的**Forchheimer** 模型, 用于油藏和井
- ◆ 基于扩散/速度的分散模拟
 - 节理系统
- ◆ 减少数值离差

其他GEM 功能

□ 典型的全油藏模拟器功能

- ◆ 能够指定空间相关属性，包括吸附，岩石力学...
- ◆ 各种初始化，包括饱和和未饱和煤层

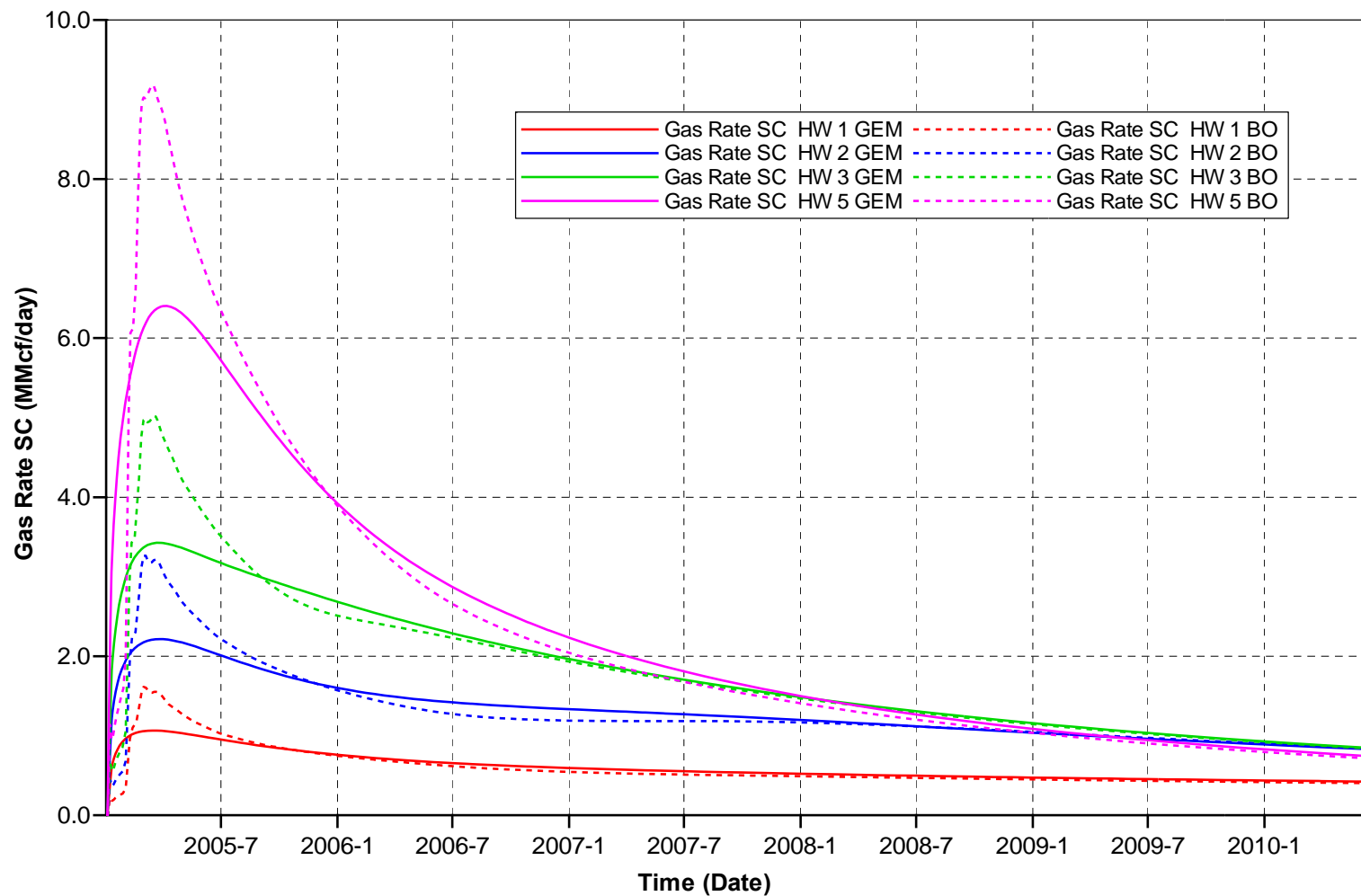
□ 全部基于**windows**的输入处理和图形

准确模拟煤层物理现象的重要性

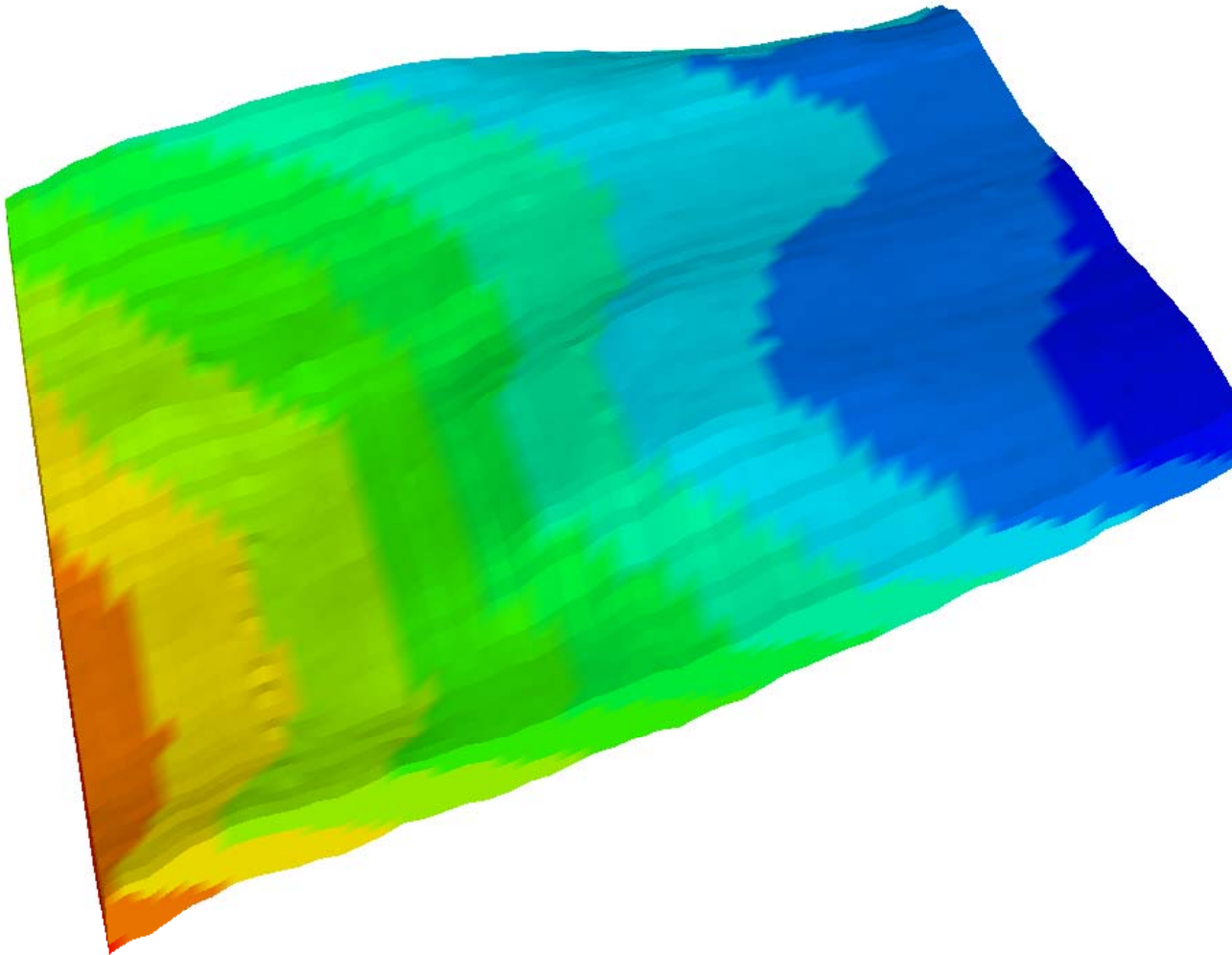
- ❑ 必须模拟扩散作用及多重组分的吸附和解吸附作用
- ❑ 模拟器必须能够遵守物理现象的规律。
 - ◆ 煤处理为煤，而不是当做不可动油
 - ◆ 模拟扩散流动
 - ◆ 利用**Palmer-Mansoori**模拟压缩/膨胀
 - ◆ **ECBM**的**EOS** 模拟器
 - 多组分气体 (**CH₄**, **CO₂**, **N₂**, ...)
 - 多组分吸附/解吸附等温线
 - 多组分扩散模拟（径向扩散）
 - 多组分压缩/膨胀（扩展的**P-M**模拟）
 - ◆ 处理裂缝（割理）渗透率

组分方法vs.黑油方法

1, 2, 3, 5 Horizontal Well Comparison
CBM Simulator (GEM) vs. Black Oil Simulator



敏感性分析



煤储藏参数

Reservoir Parameter	Metric Units	API Units
Depth - Top of Coal	1,050 m to 1,090 m	3,450 ft to 3,575 ft
Net Pay	5 m	16 ft
Pressure	12,000 kPa	1,735 psi
Temperature	37 C	99 F
Face Cleat Permeability (mD)	0.4 / 4 / 10	0.4 / 4 / 10
Butt Cleat Permeability (mD)	0.08 / 0.8 / 2	0.08 / 0.8 / 2
Vertical Permeability (mD)	.04 / 0.4 / 1	.04 / 0.4 / 1
Relative Permeability Curve	Corry	Corry
Permeability Rebound	Palmer & Mansoori	Palmer & Mansoori
Skin	-2 / 0 / 2 / 5	-2 / 0 / 2 / 5
Water Saturation	100%	100%

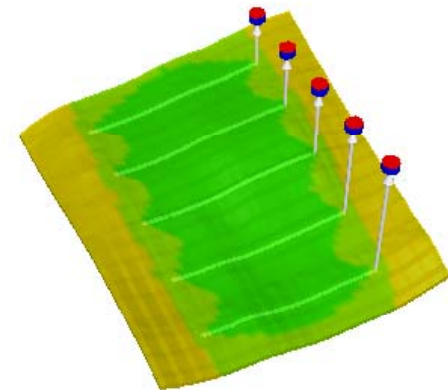
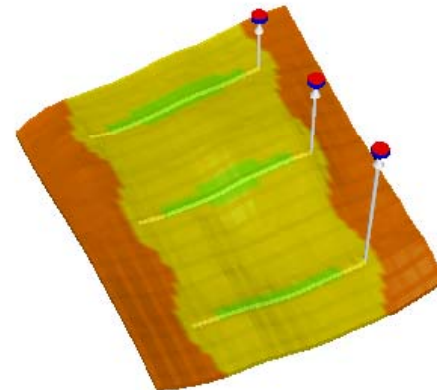
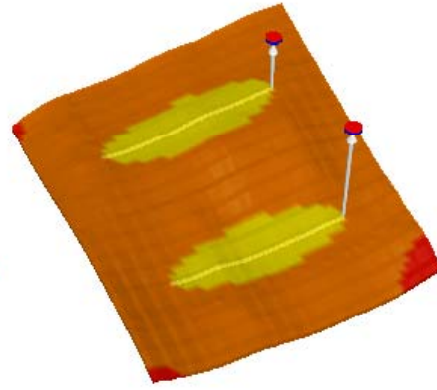
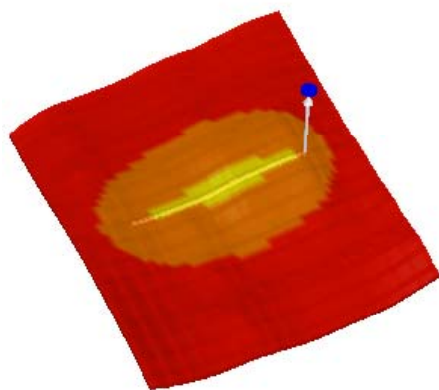
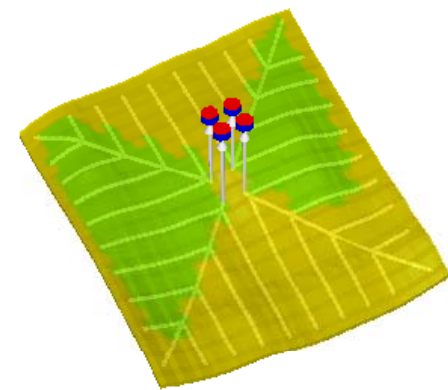
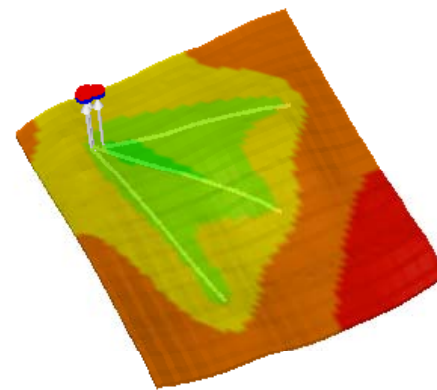
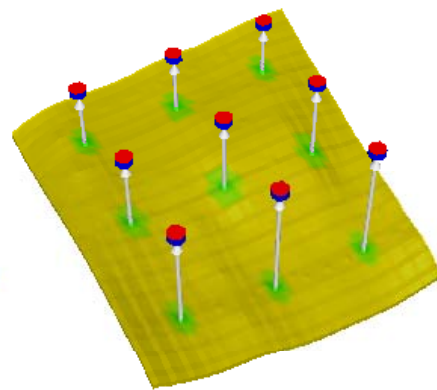
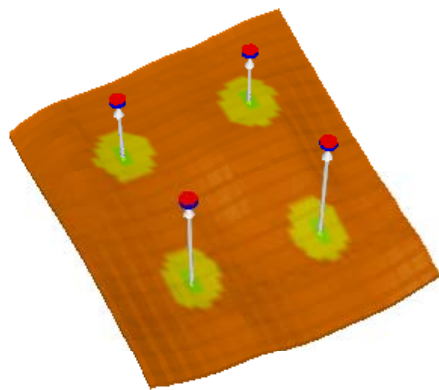
Langmuir Parameters	Metric Units	API Units
Gas Volume	5 / 10 / 15 m ³ /tonne	160/ 320 /480 scf/ton
Pressure	12,000 kPa	1735 psi
Isotherm Temperature	34 C	93.5 F
Ash	4.87%	4.87%
Moisture	12.60%	12.60%
Density	1.4	1.4

井及约束条件

	Vertical Wells	Horizontal Wells	Pinnate Wells
Wells Per Section	4 / 9 / 16	1 / 2 / 3 / 5	4

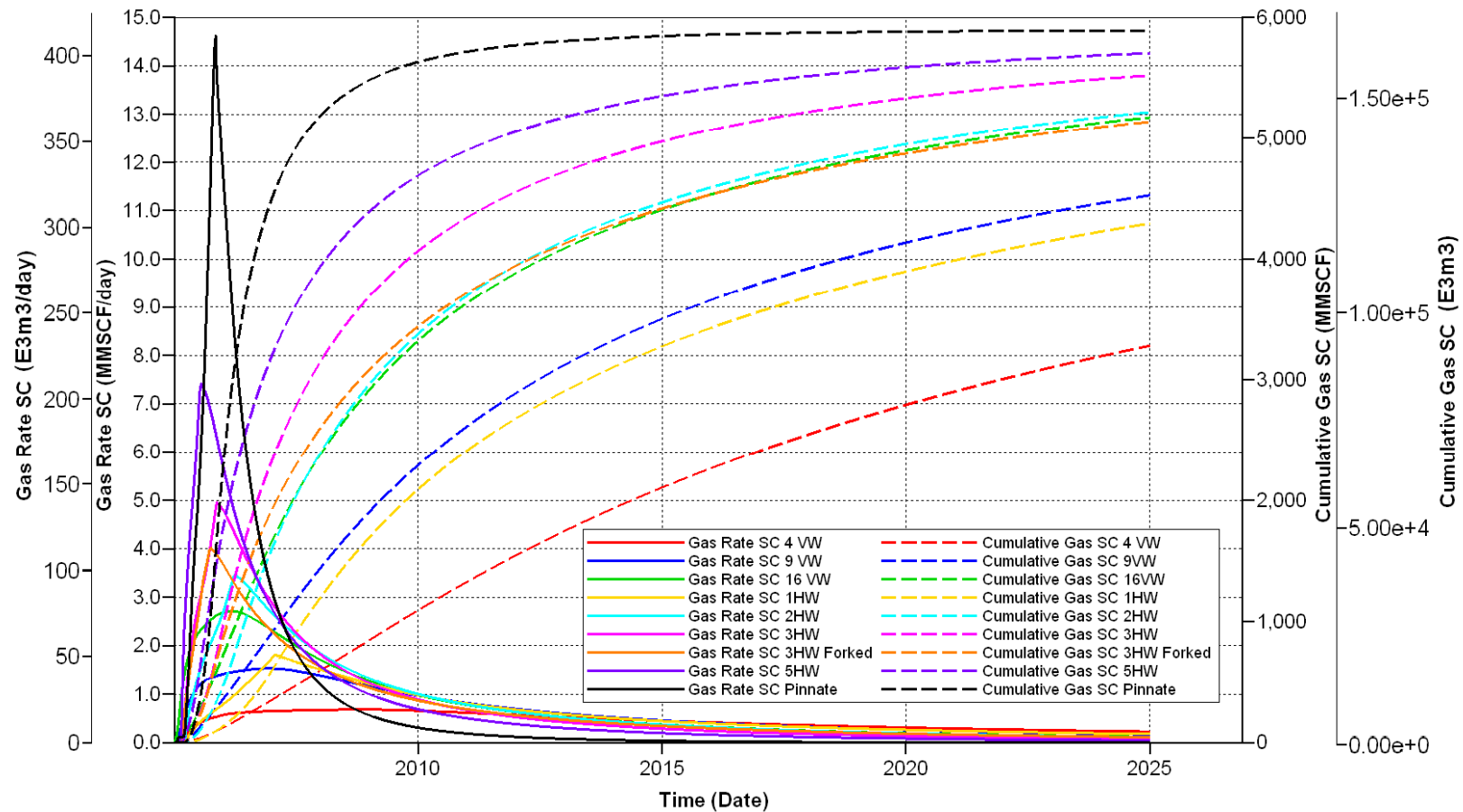
Well Parameter	Metric Units	API Units
Minimum BHP	200 kPa	30 psi
Maximum Water Rate	100 / 200 / 300 m ³ /d	625 / 1250 / 1900 bbl/d
Pinnate Max Water Rate	125 / 250 / 375 m ³ /d	800 / 1575 / 2350 bbl/d
Horizontal Section	1,000 m	3,280 ft

井型和井数敏感性



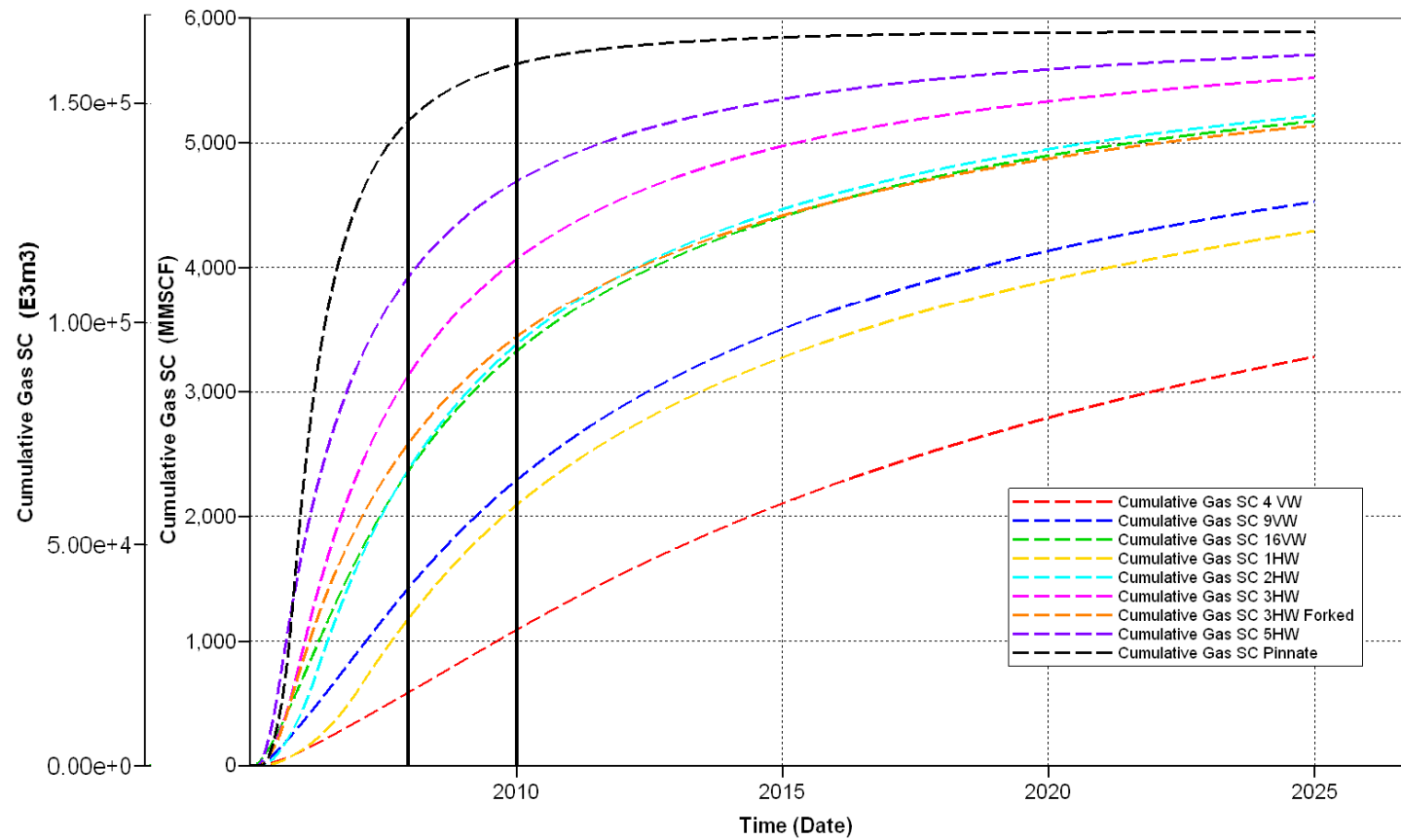
井型和井数敏感性

Vertical vs. Parallel & Forked Horizontal vs. Pinnate
Mannville Coal



井型和井数敏感性

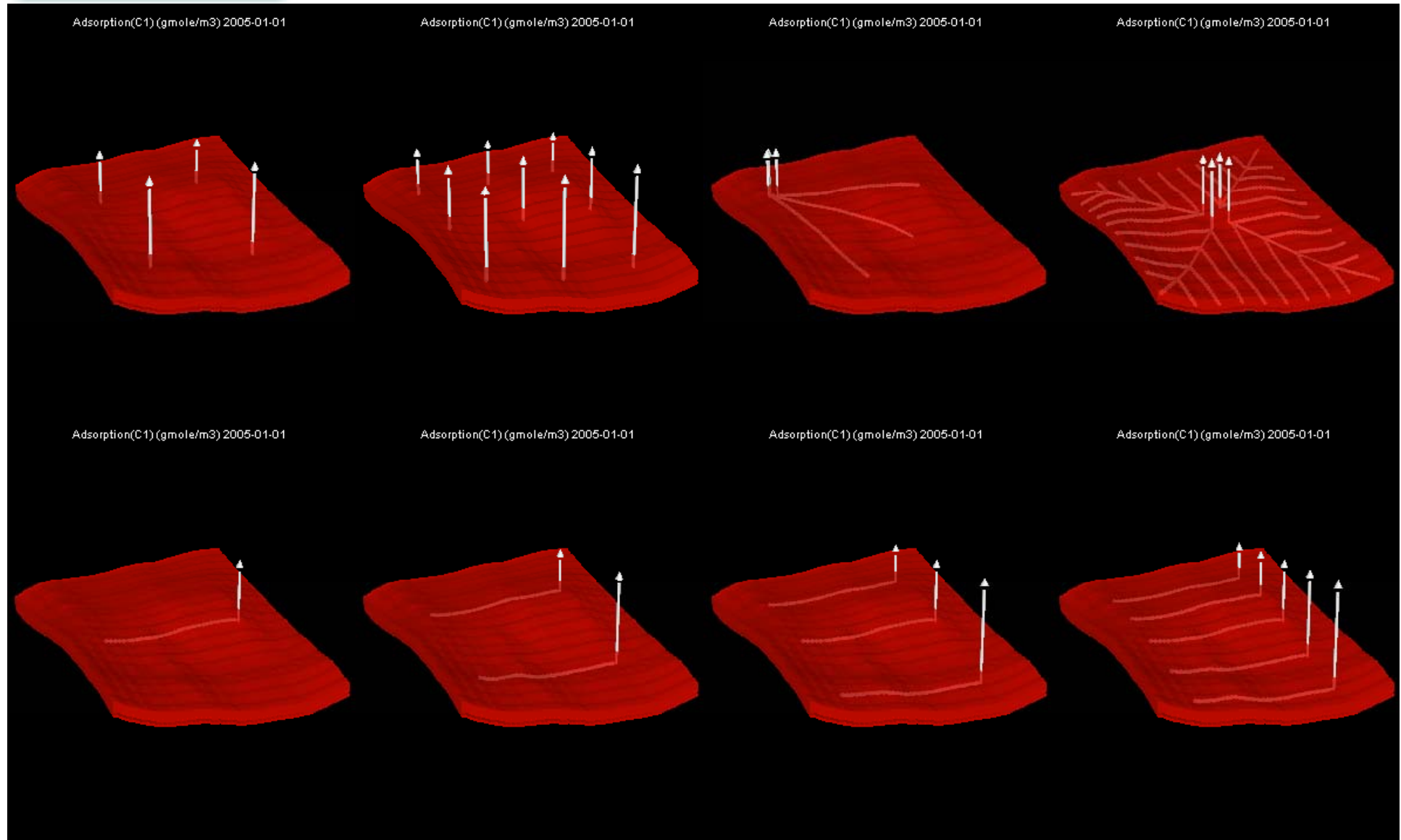
Vertical vs. Parallel & Forked Horizontal vs. Pinnate
Mannville Coal



气在哪？

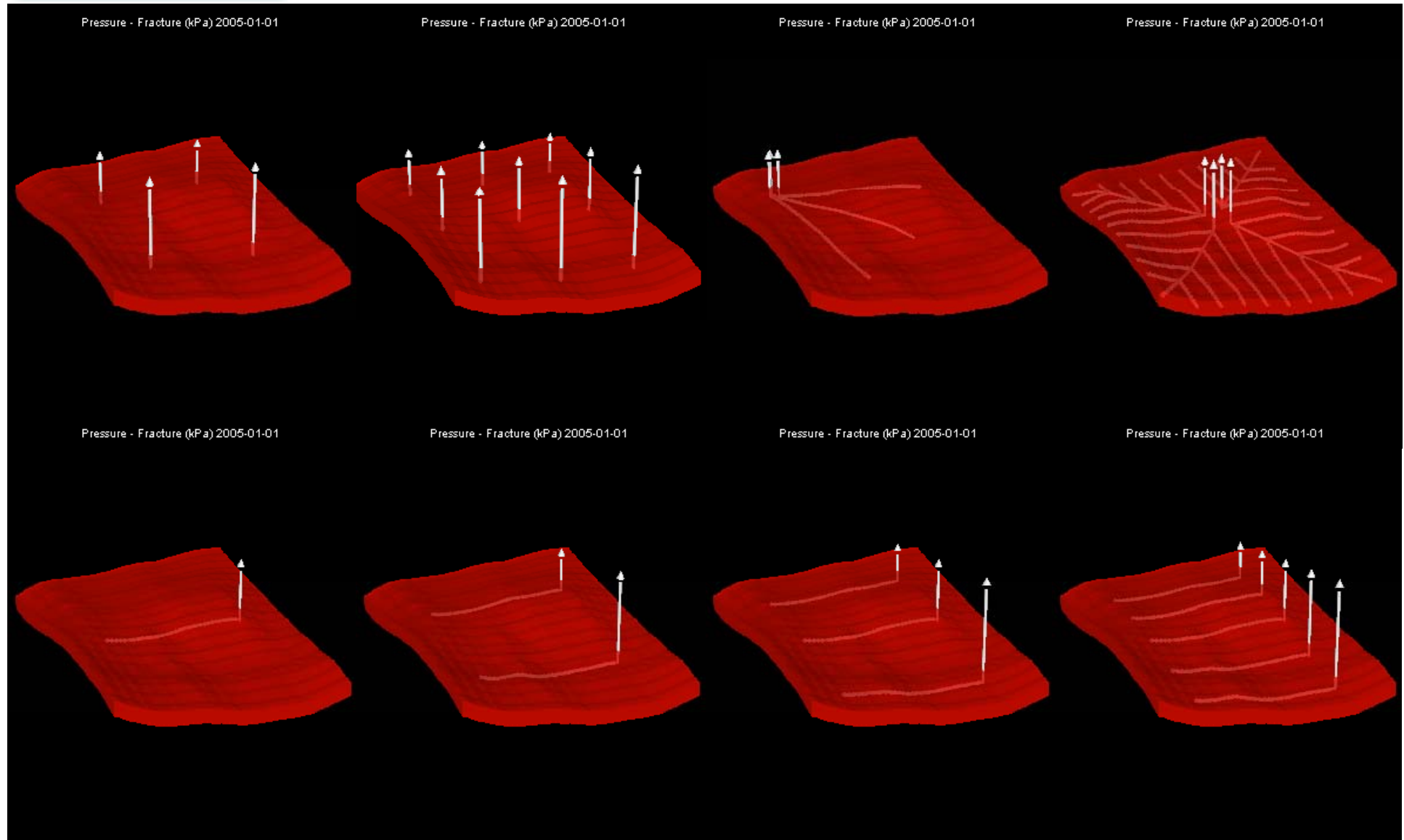
超过10年的吸附气

Red – highest (10cc/g), Blue – lowest (0.75cc/g)



超过10年的裂缝压力

Red – highest (12,000 kPa) Blue – lowest (200 kPa)

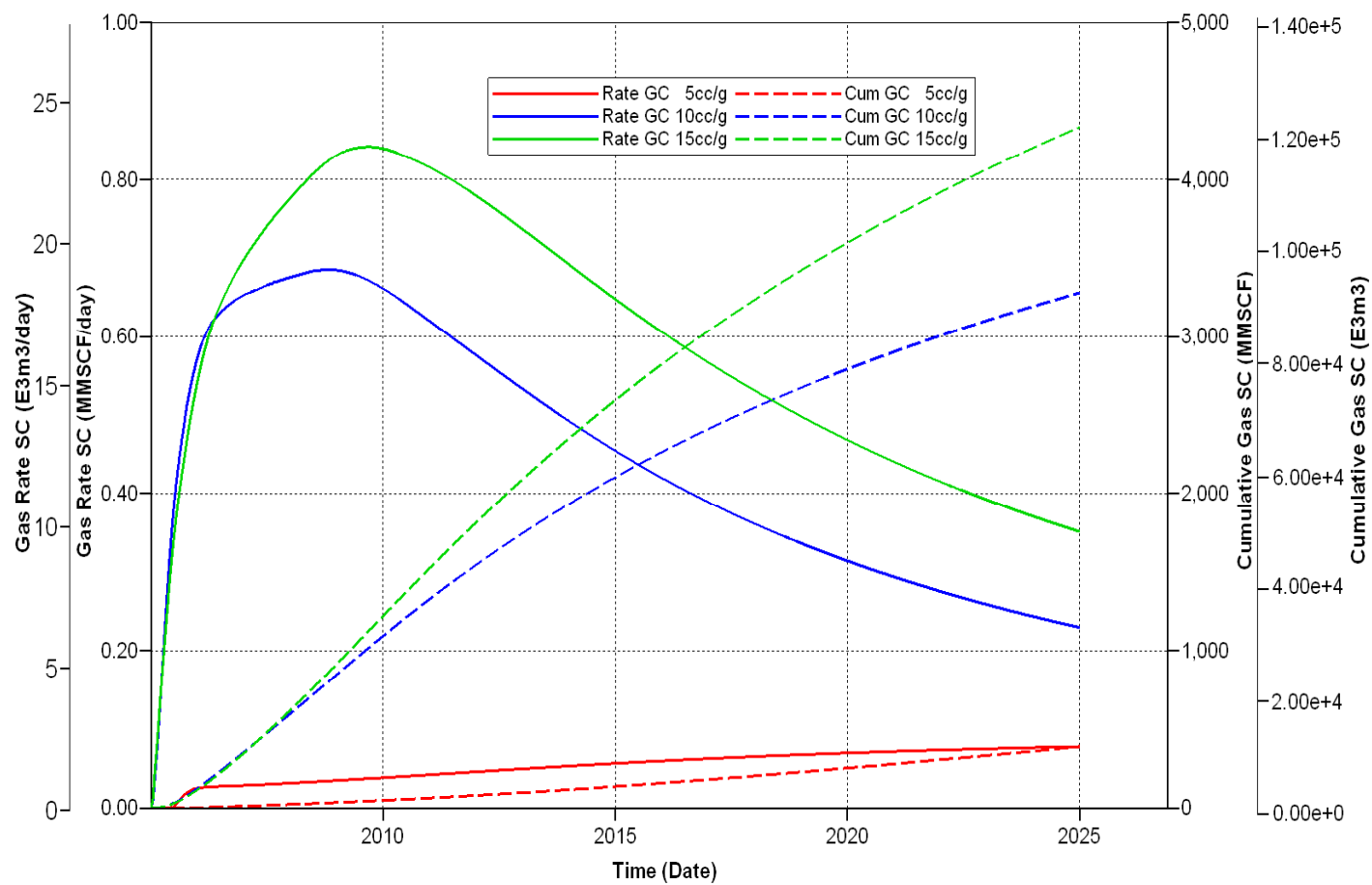


油藏参数敏感性

- 含气量
- 裂缝（节理）渗透率
- 表皮效应
- 产水量
- 相对于面节理的井向

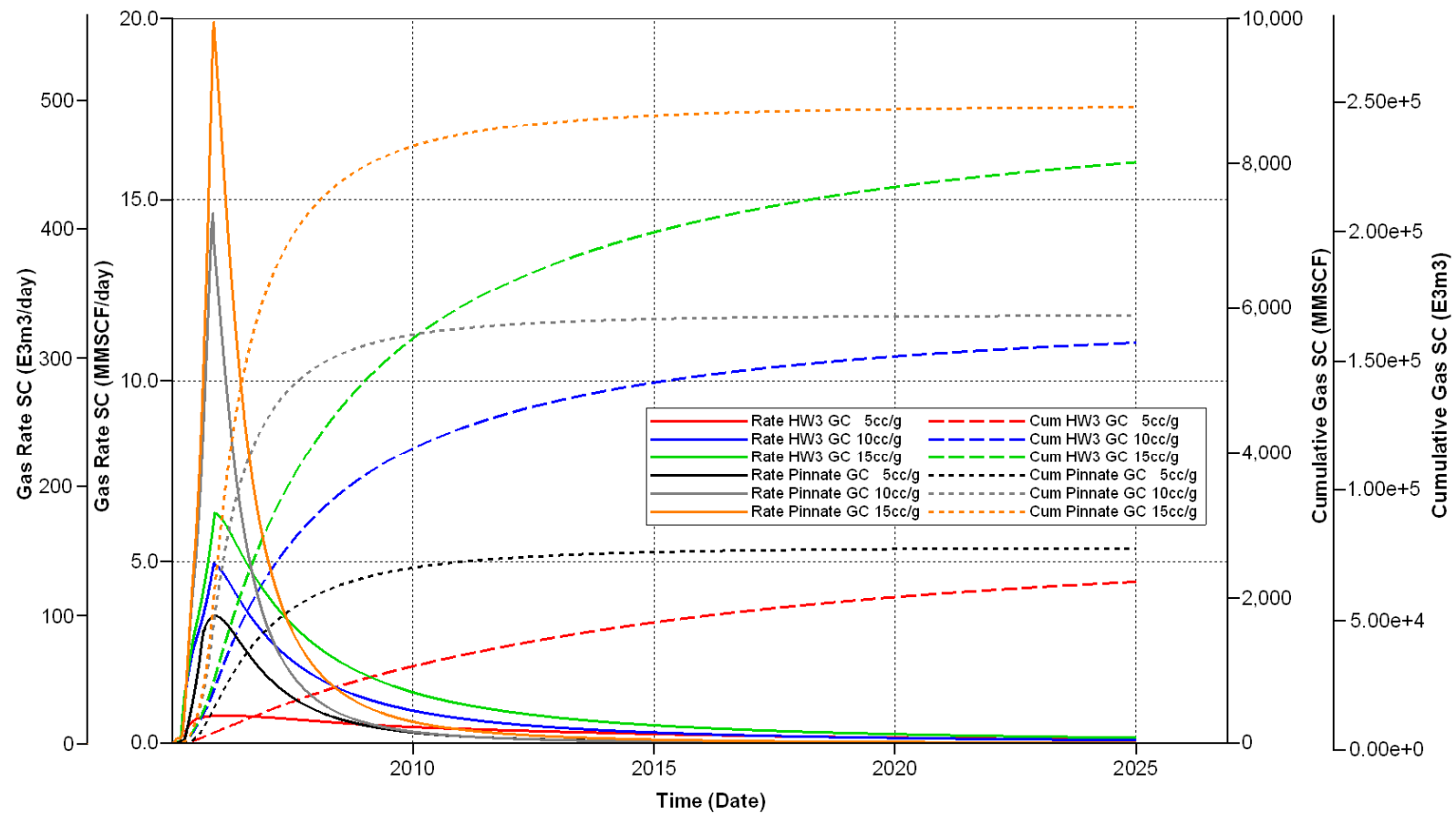
含气量敏感度

4 Vertical Wells
Mannville Coal



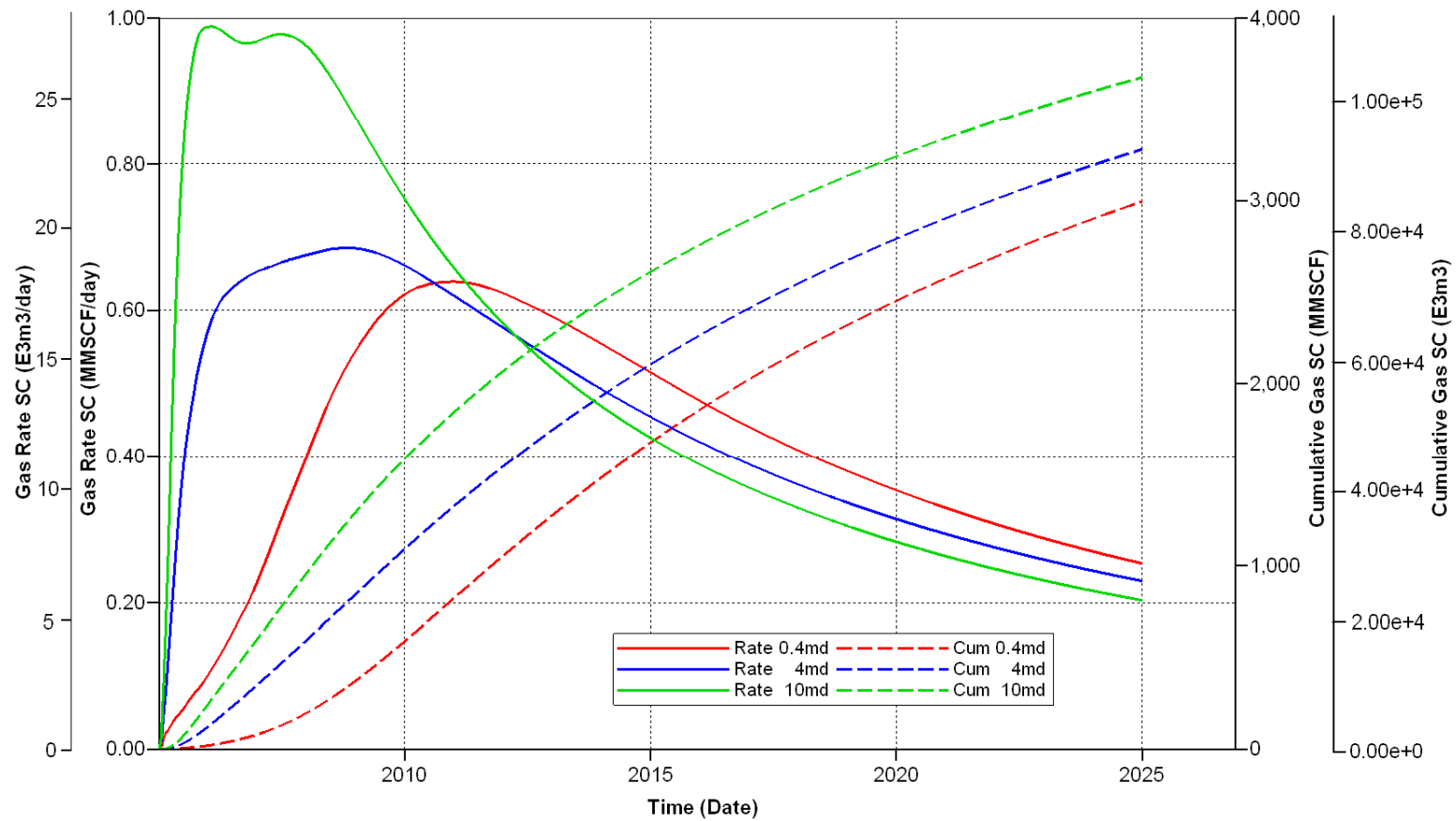
含气量敏感度

3 Horizontal and 4 Pinnate Wells Mannville Coal



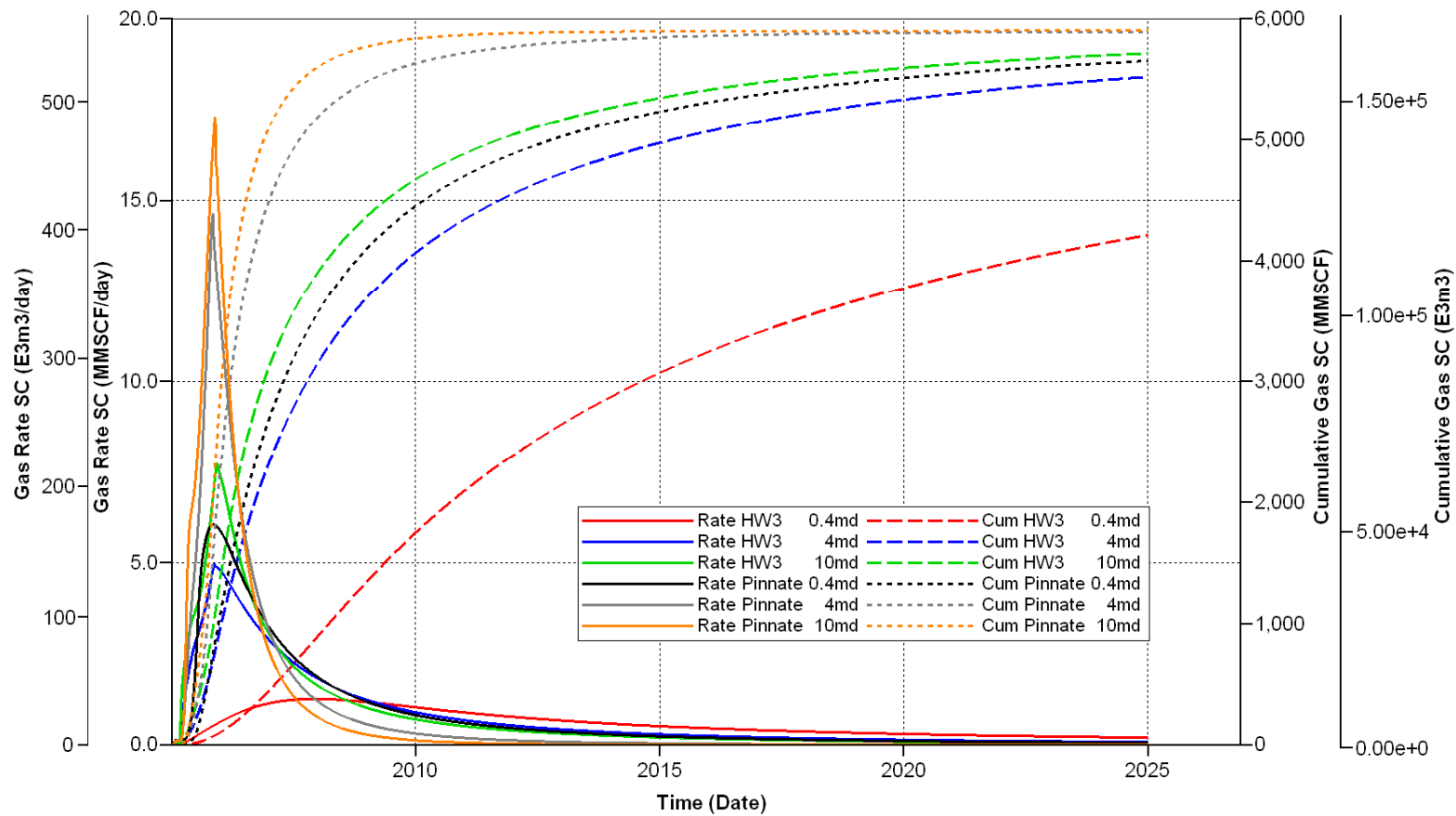
渗透率敏感性

4 Vertical Wells
Mannville Coal



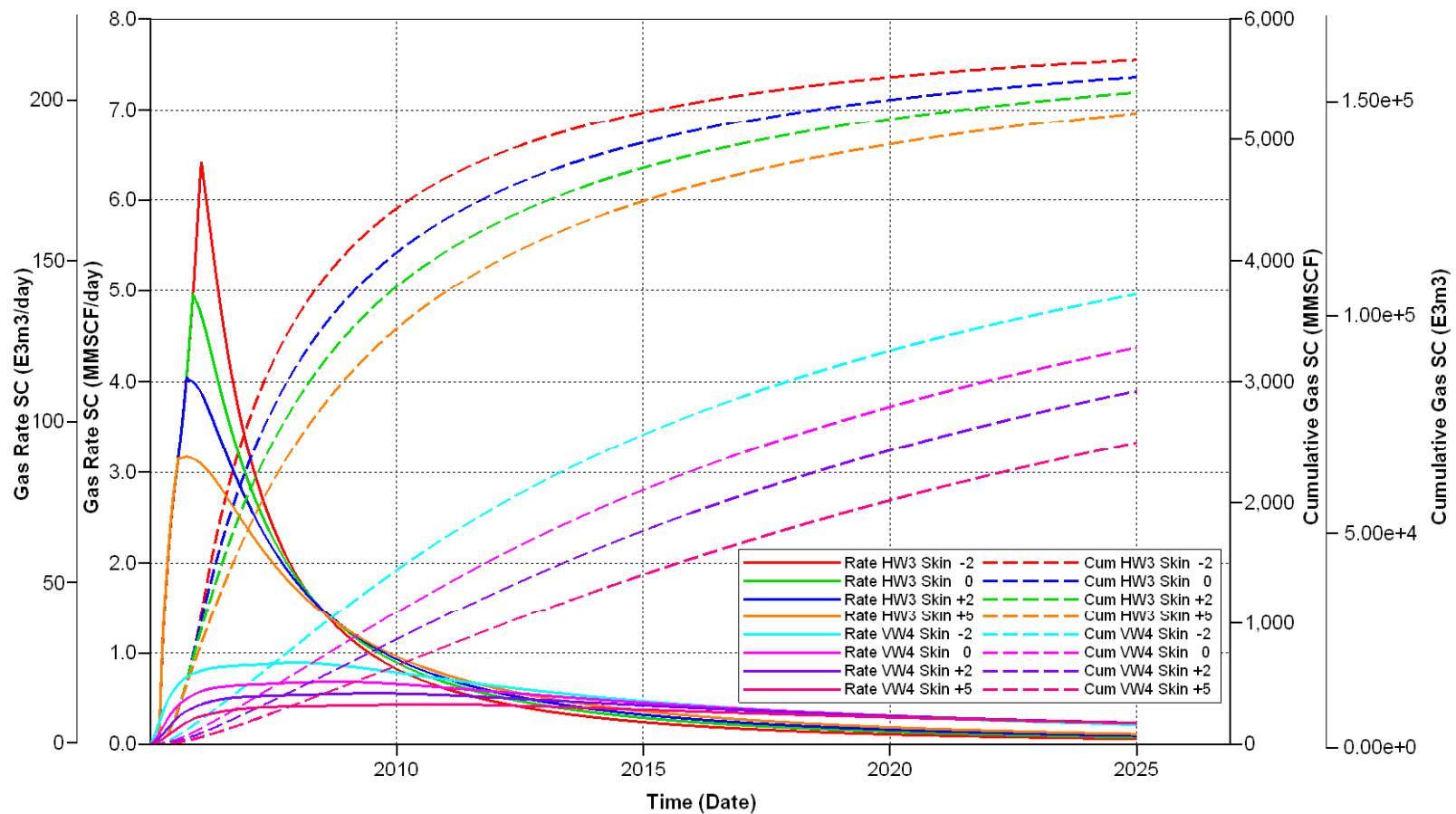
渗透率敏感性

3 Horizontal and 4 Pinnate Wells
Mannville Coal

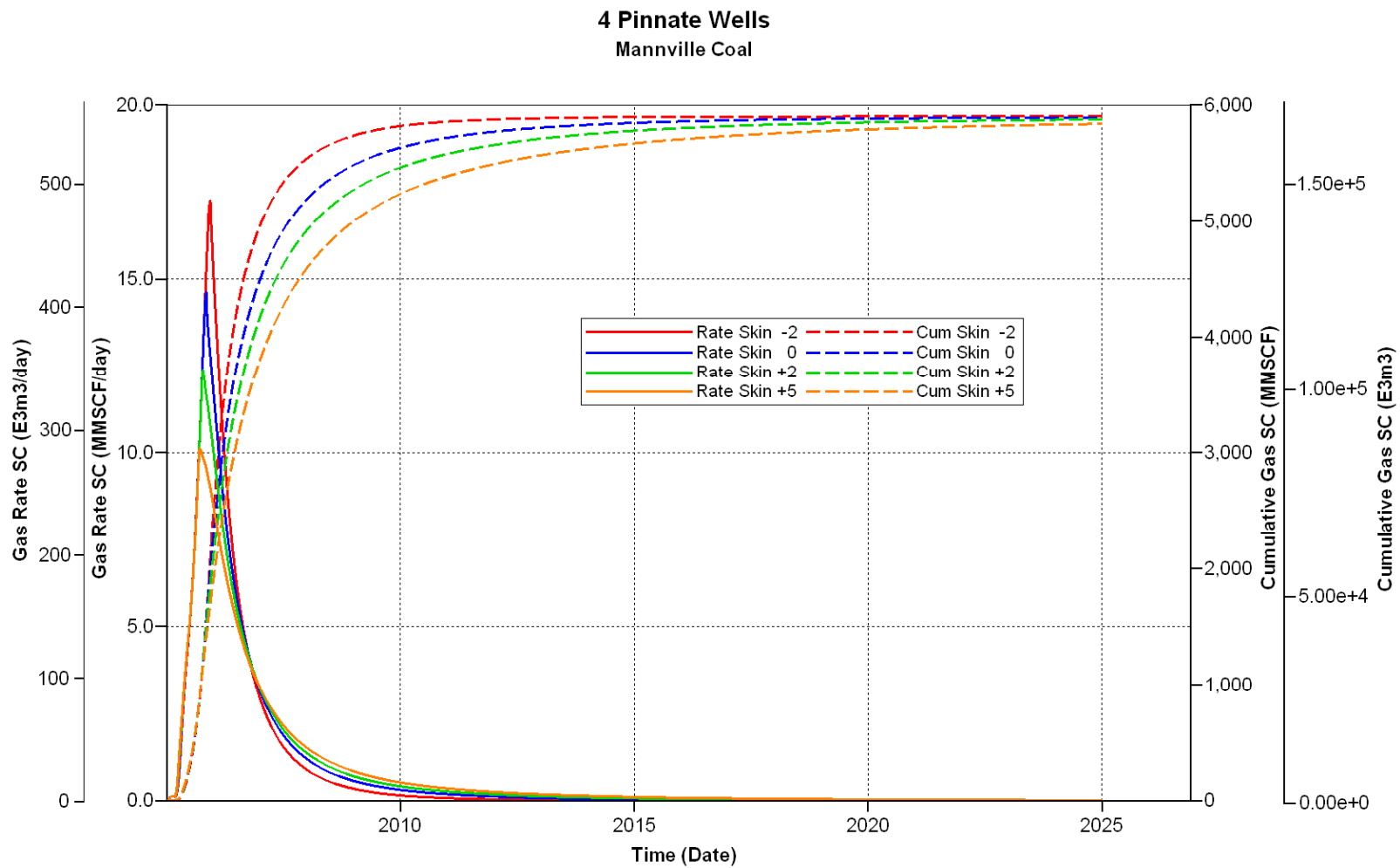


表皮因子敏感性

3 Horizontal and 4 Vertical Wells
Mannville Coal

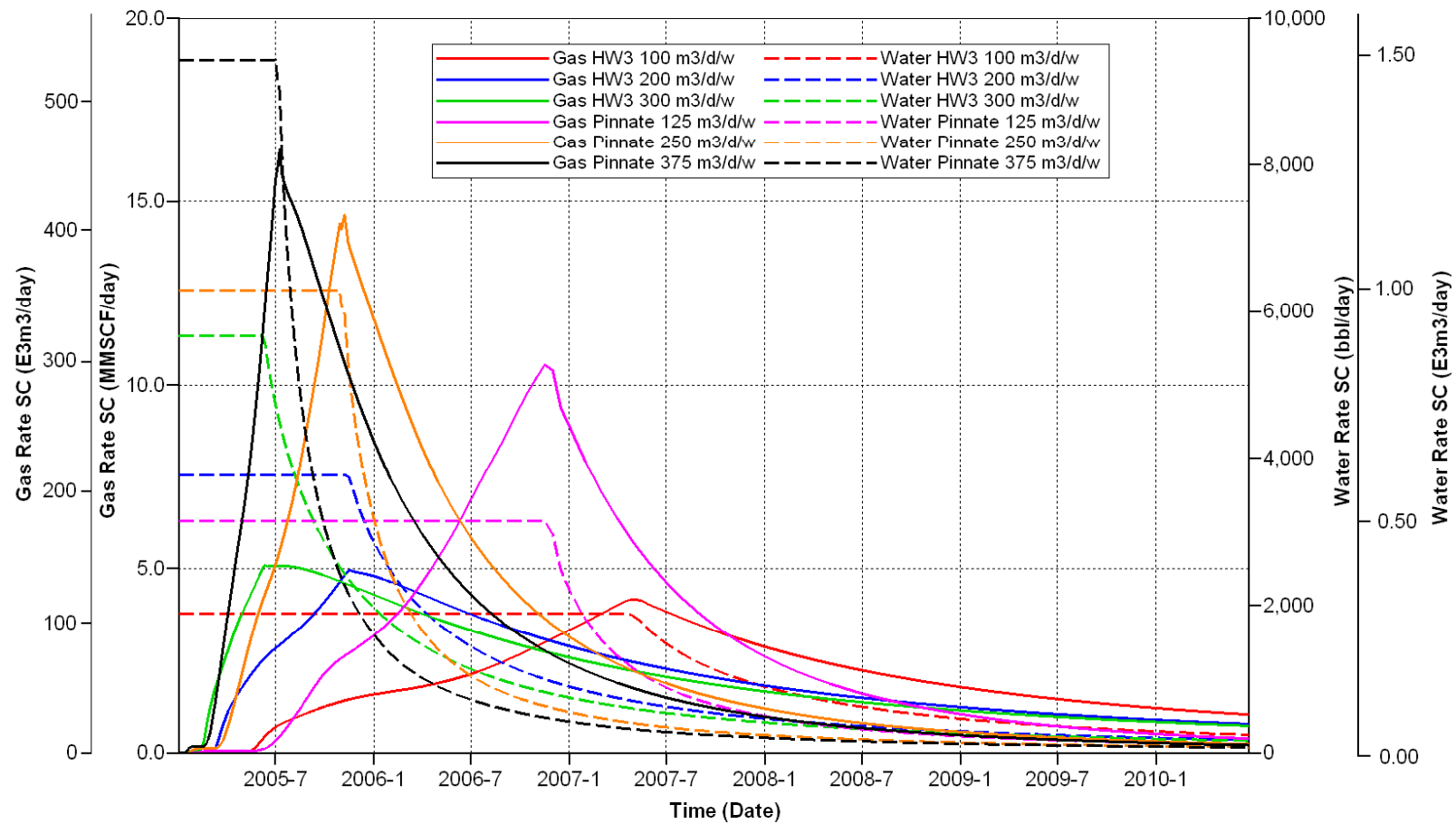


表皮因子敏感性

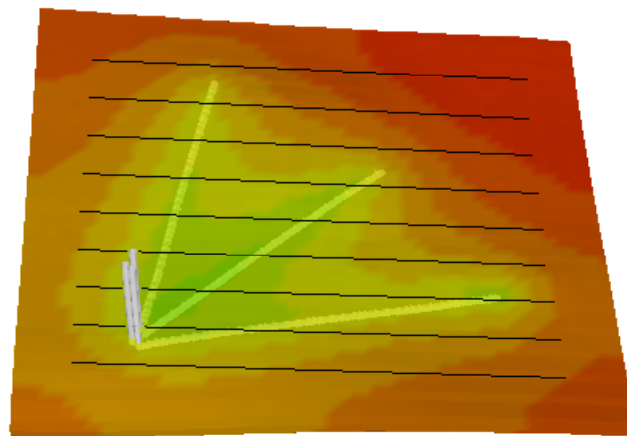
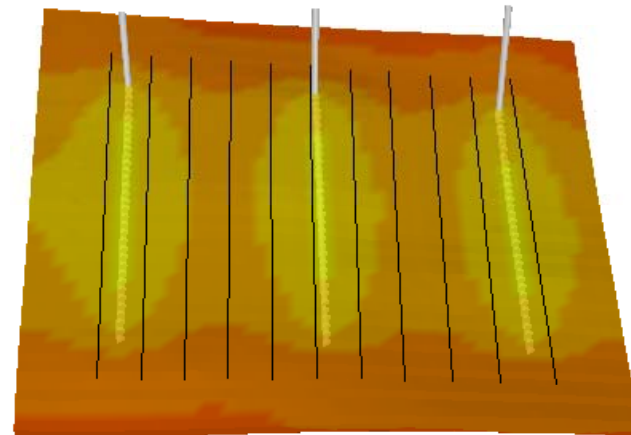
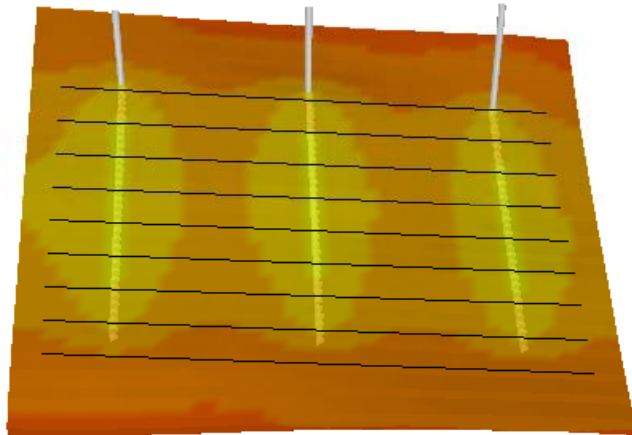


产水量敏感性

3 Horizontal and 4 Pinnate Wells Mannville Coal

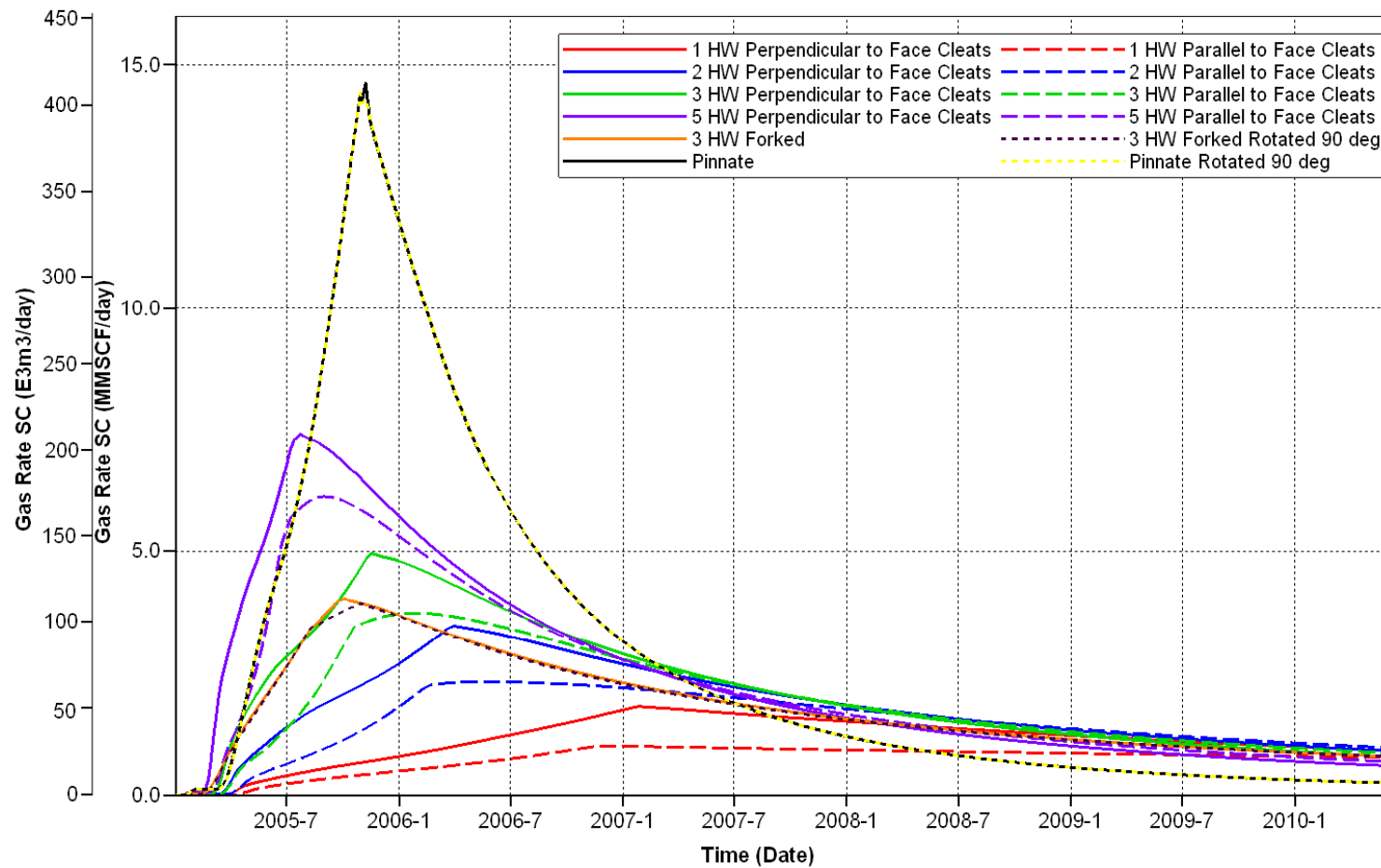


相对于面节理的井向

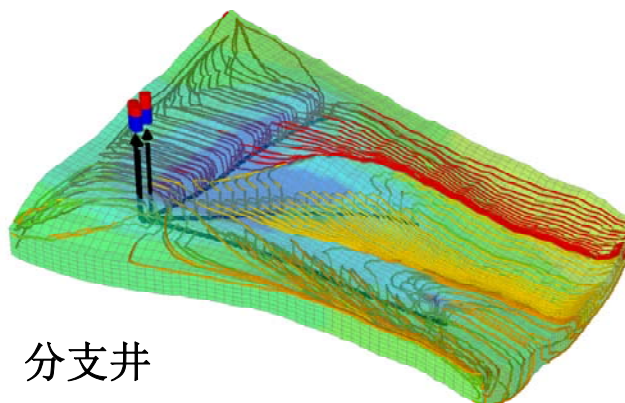
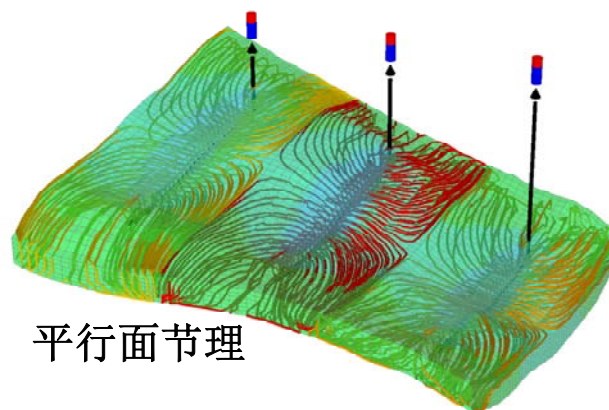
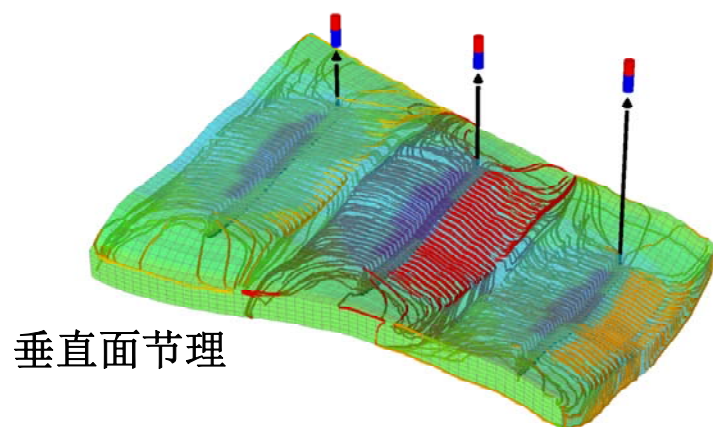


井向敏感性

Vertical vs. Parallel & Forked Horizontal vs. Pinnate
Mannville Coal

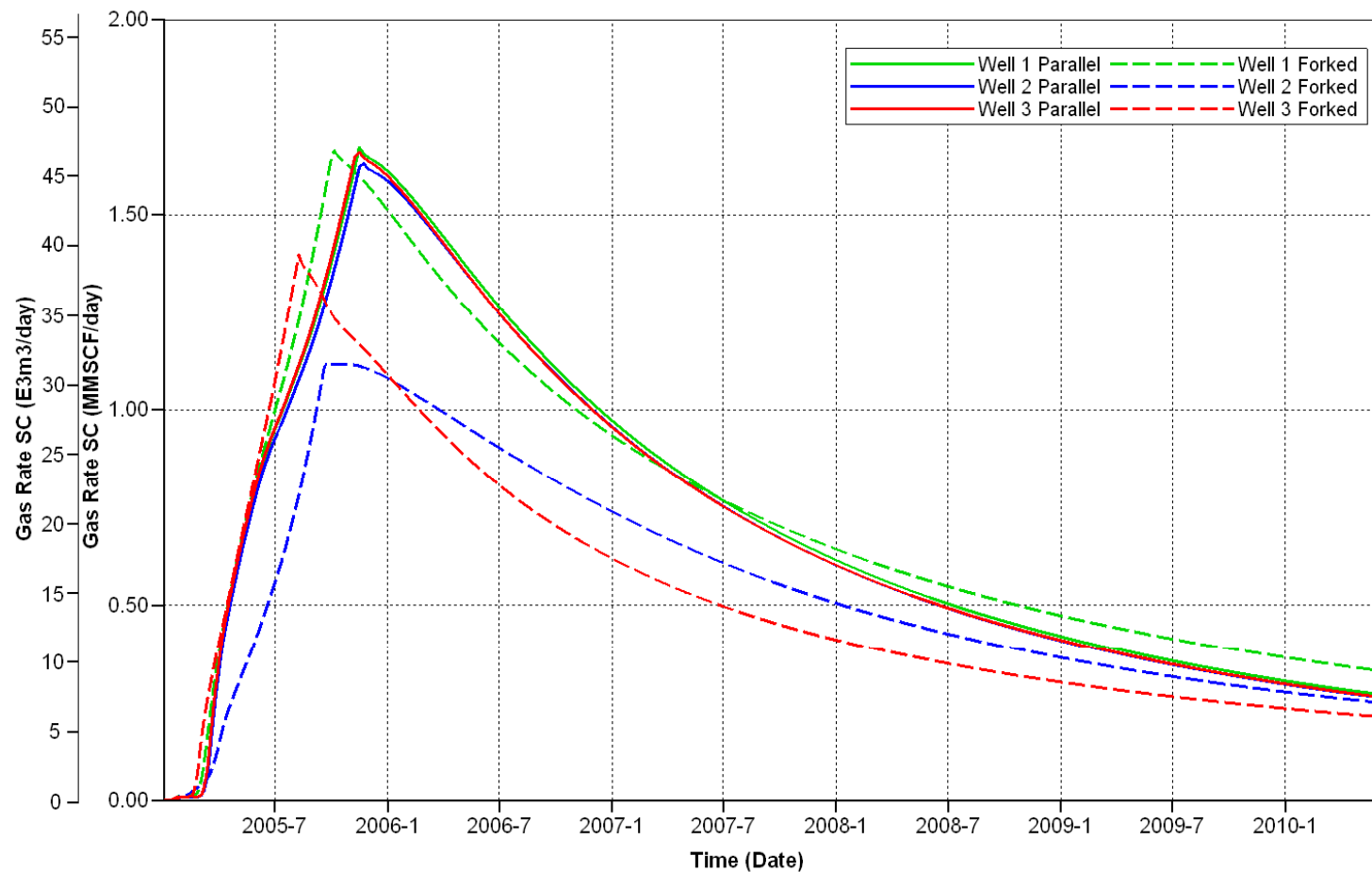


井向和气体流动路径



井向敏感性

3 Horizontal Wells Parallel vs. Forked
Mannville Coal



其它案例模型

□ GEM可用于 CBM 的

- ◆ 研究模拟 (直井、水平井和其它井型)
- ◆ 不同的完井技术
- ◆ 单井模型和现场研究

不同完井模拟

- ❑ 直井**CBM**模拟
- ❑ 水平井**CBM**模拟
- ❑ 多分支井**CBM**模拟
- ❑ 洞穴井**CBM**模拟 (**Cavity Well**)
- ❑ 煤矿排气模拟

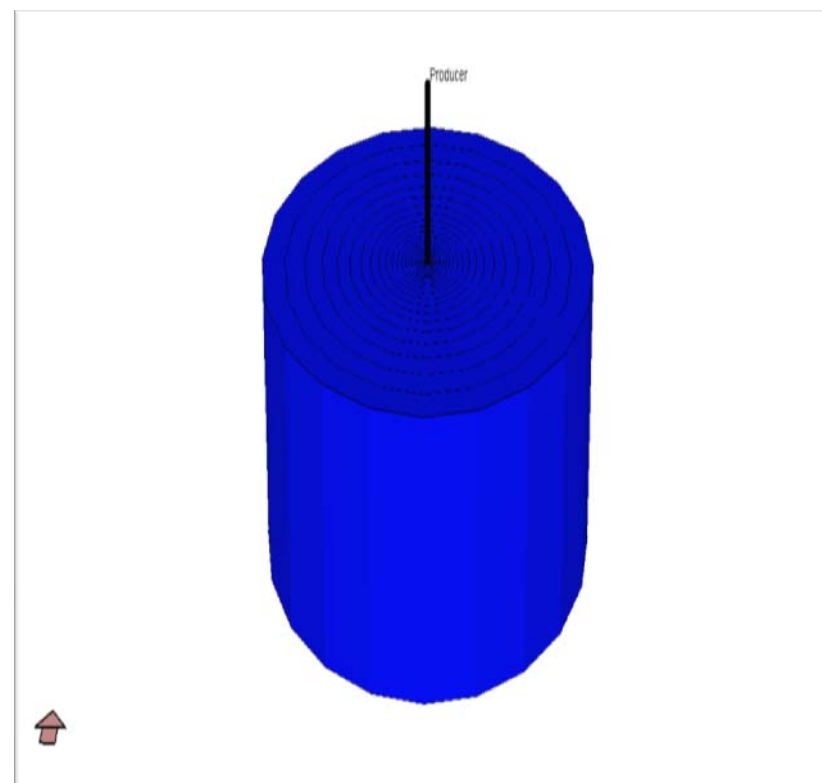
不同完井模拟

□ 直井**CBM**模拟

- ◆ 网格类型-径向、直角和角点
- ◆ 单井、多井方案
- ◆ 裸眼完井或者射孔完井

不同完井模拟

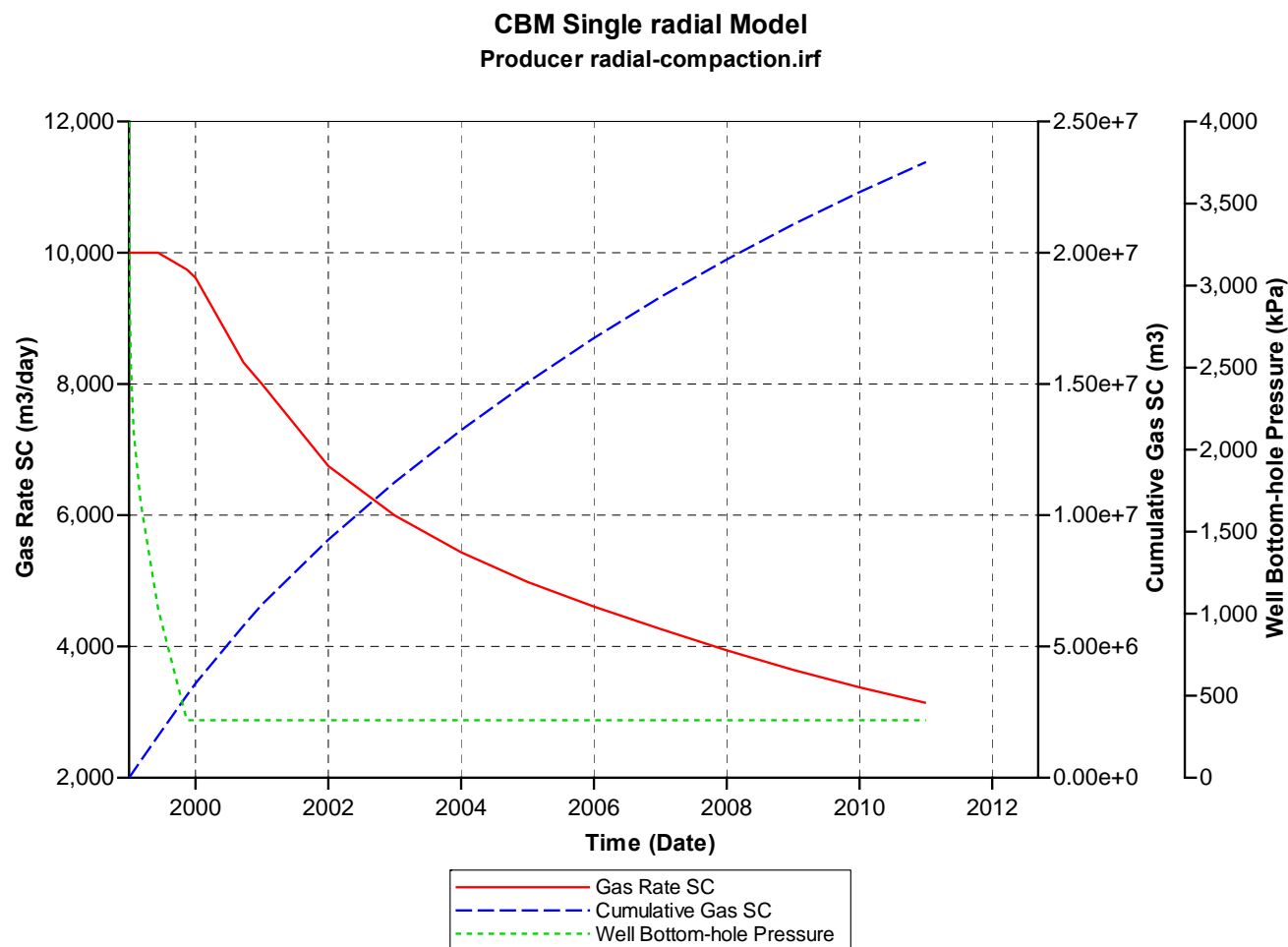
- 单井**CBM**模拟
- 径向模型：
 - ◆ 确定井筒参数；
 - ◆ 在**PTA**拟合压力历史
 - ◆ 查看**CBM**开采过程中收缩和膨胀的效果



不同完井模拟

- 径向模型 **29 x 1 x 1**
- 裂缝孔隙度– **0.005**
- 裂缝渗透率– **3.65 md**
- 裂缝间距 **0.2 meters**
- 初始压力– **7650 Kpa**
- 饱和煤层
- 流动井底压力约束在 **300 Kpa**

不同完井模拟



不同完井模拟

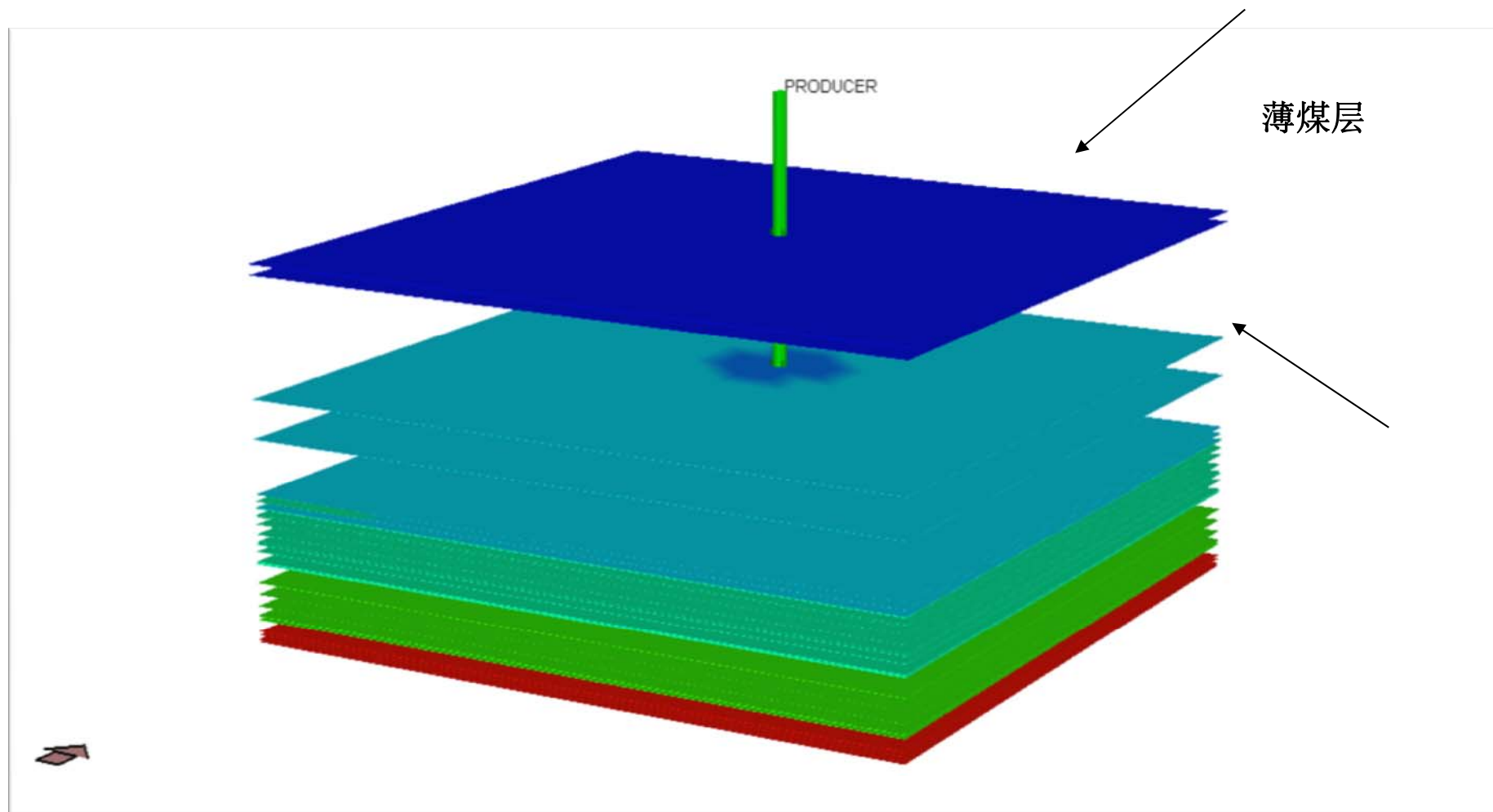
□ 直角网格模型

- ◆ 查看多层模式;
- ◆ **To investigate aerial extent of the CBM field response;??**
- ◆ 查看 串流模型;
- ◆ 查看排水 过程

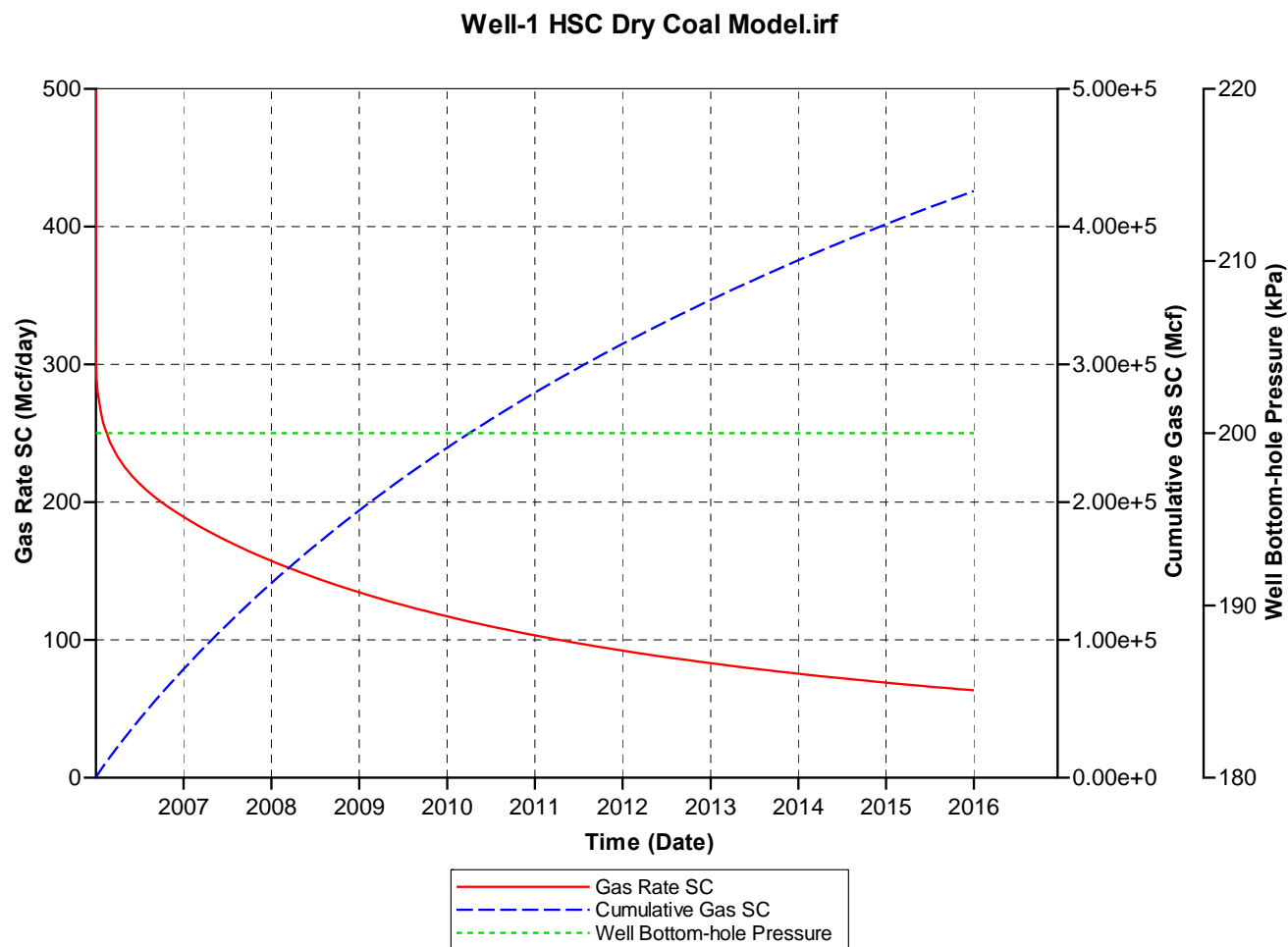
不同完井模拟

- ❑ 典型加拿大浅层煤层气
- ❑ 多层开采
- ❑ 大部分无水或者有少量水的干气开采
- ❑ **0.5m到3m的不同厚度的煤层**
- ❑ 由页岩/砂岩隔开
- ❑ 孔隙度 ~ **0.01**
- ❑ 渗透率范围**0.4 – 12 md**
- ❑ 裂缝间距– **0.2 meters**

不同完井模拟



不同完井模拟



不同完井模拟

□ 角点网格模型

- ◆ 通常用于全油田**CBM**模拟
- ◆ 查看总压和排水响应
- ◆ 需要全细节煤层描述

□ 角点网格系统

- ◆ 网格总数 (>20,000) ， 最高1 百万个网格
- ◆ 可以对每个网格匹配不同的等温线
- ◆ 全油藏开发分析

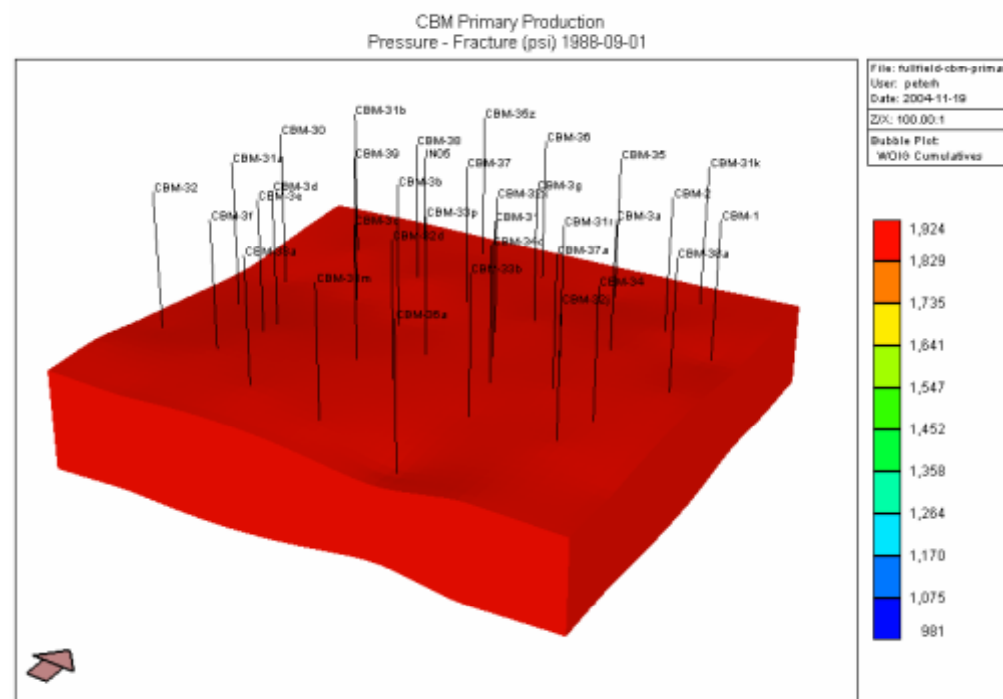
不同完井模拟

- 典型美国圣胡安油田**CBM**模型
- **46 x 42 x 1** 网格
- 厚度范围**25 – 49 feet**
- 孔隙度范围**0.002 到0.006**

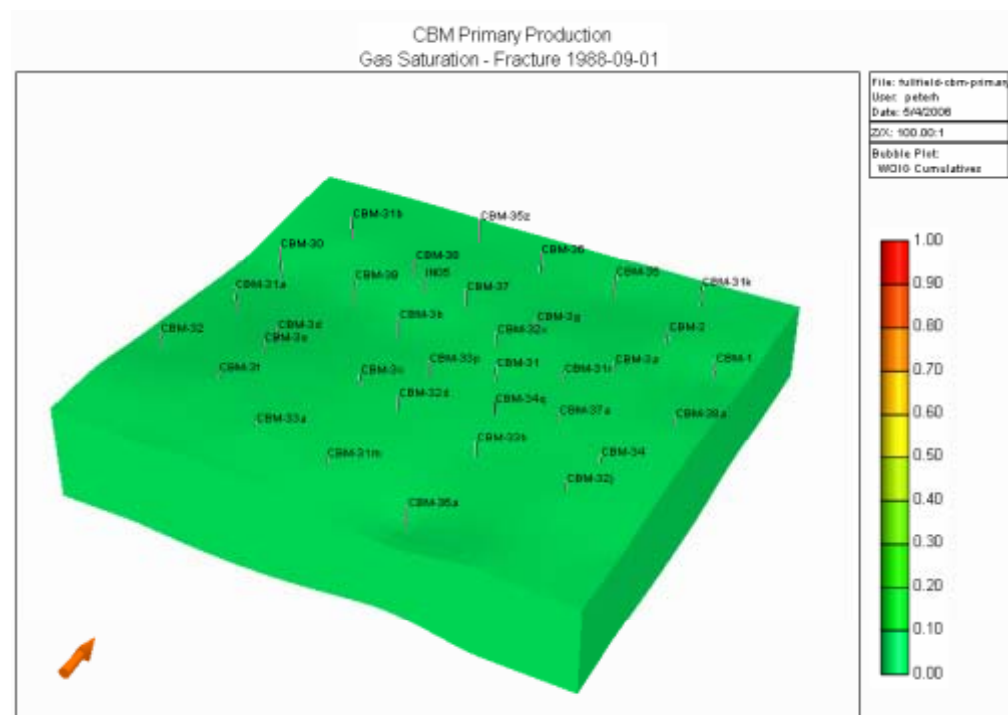
不同完井模拟

- 渗透率范围**1 到50 md**
- 垂直渗透率是水平渗透率的**1/3**
- 岩石密度范围**92 到 105 lb/ft³**
- 非常高的含水饱和度, **98 %**
- 压力**1923 Psia**, 饱和煤层
- **35** 口生产井
- 于**1998**年开始投产

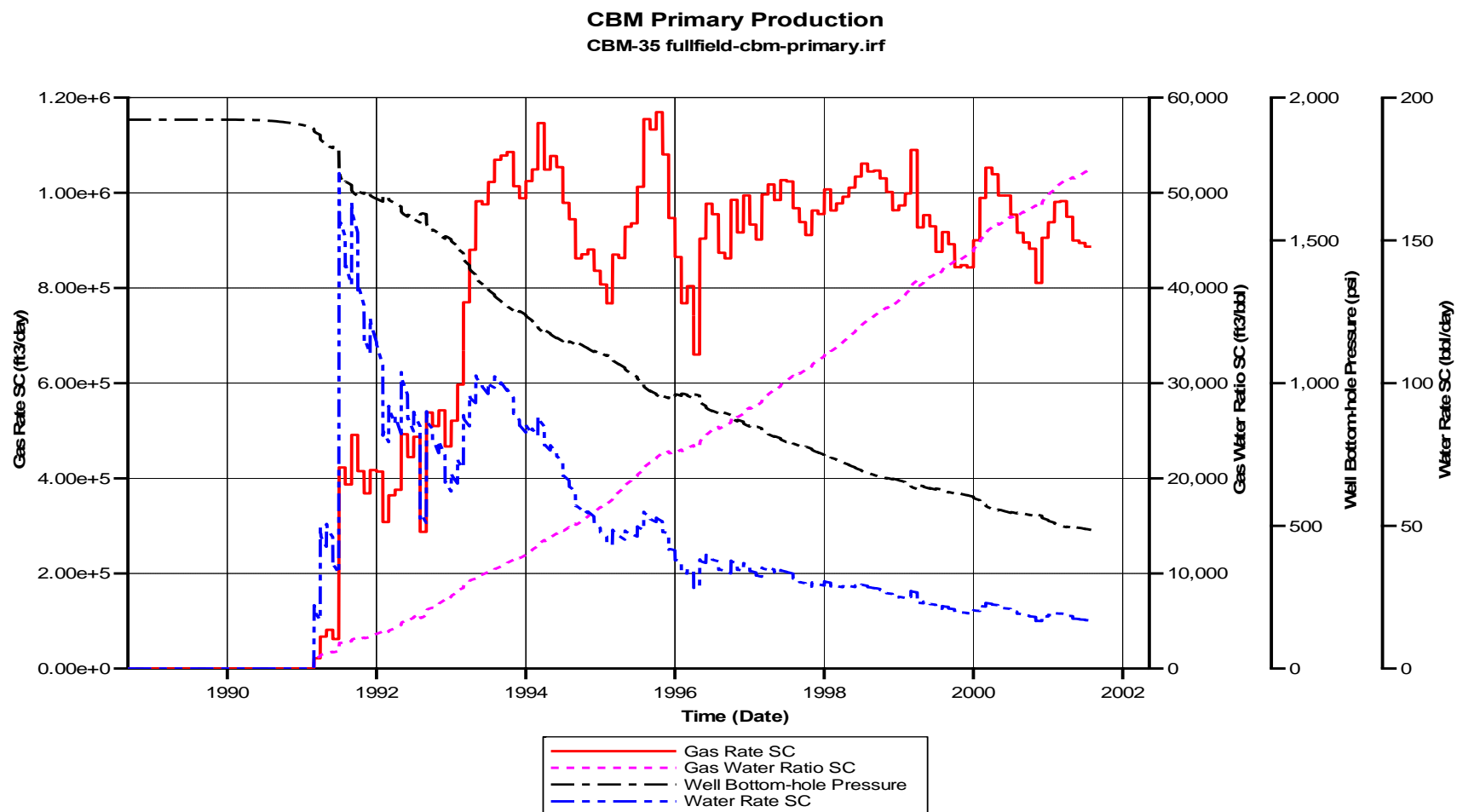
不同完井模拟



不同完井模拟



典型CBM生产曲线图



不同完井模拟

□ 水平井**CBM**模拟

- ◆ 利用直角或者角点网格
- ◆ 如果需要，用户可以沿着井筒定义网格

不同完井模拟

- ❑ 典型水平井 (加拿大**Plain** 盆地)
- ❑ 长**700 - 1000 meters**, 套管/裸眼完井
- ❑ 厚**8 – 10 meters**
- ❑ 高含水饱和度, **400 m**间距
- ❑ 预计产量: **600 – 800 Mcf/d**

不同完井模拟

- 加拿大深煤层的水平井**CBM**模拟
- **40 x 40 x 11** 网格系统
- 孔隙度 (裂缝) – **0.001**
- 水平段总长**900** 米

不同完井模拟

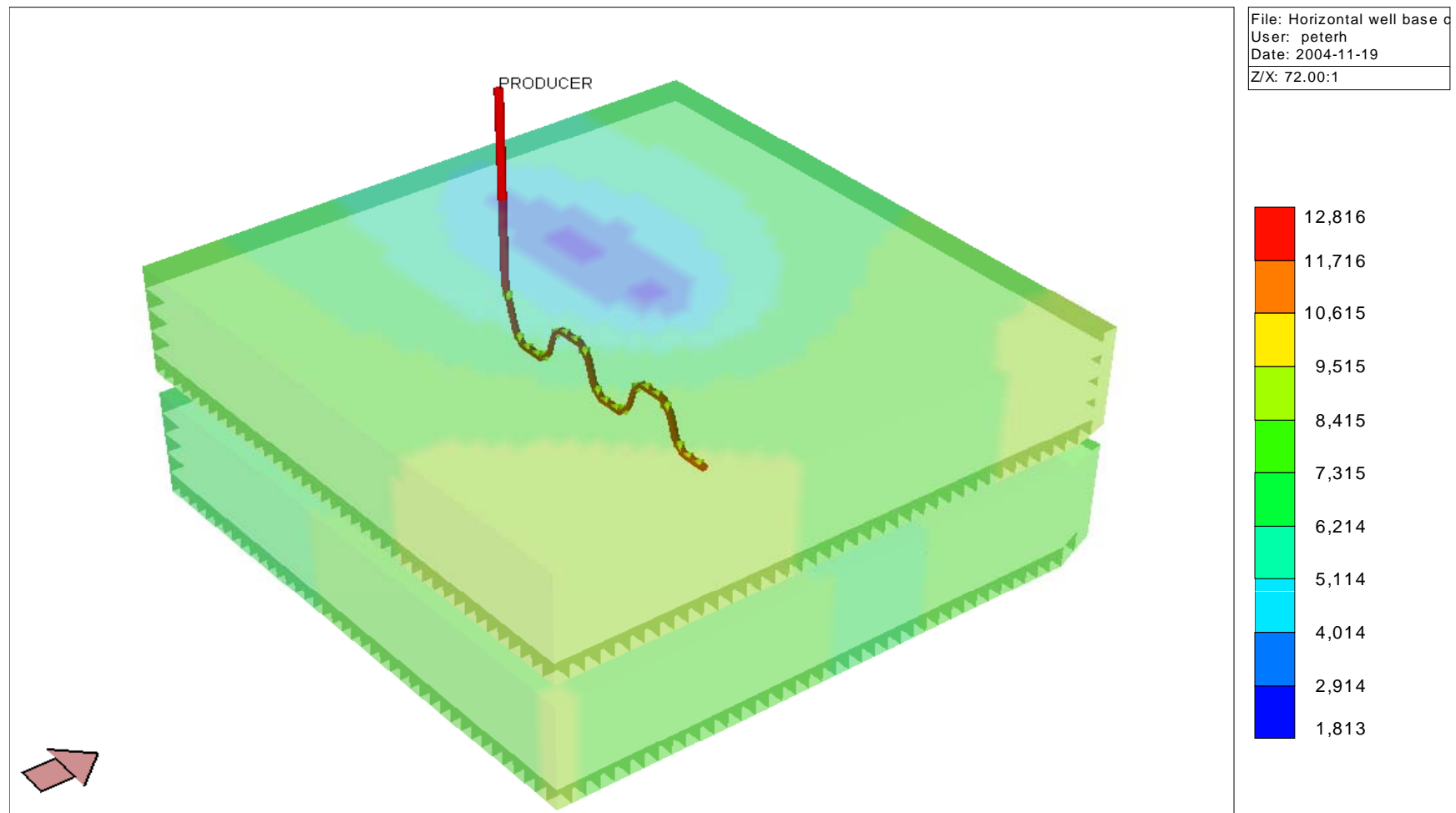
- 渗透率 (裂缝) – 0.1 md
- 裂缝间距0.25 到 0.5
- 煤层密度– 1326 Kg/m³
- 几乎所有裂缝初始饱含水

不同完井模拟

- 初始压力~ **12.7 Mpa**
- 约束条件：产水量**75 m³/day**，井底压力**350 Kpa**
- 预测**30** 年

不同完井模拟

Pressure - Fracture (kPa) 2010-11-01



不同完井模拟

□ 多分支井

- ◆ 有效的排水过程
- ◆ 更大的排水面积
- ◆ 总长**3500 – 5000 meters**
- ◆ 裸眼完井

不同完井模拟

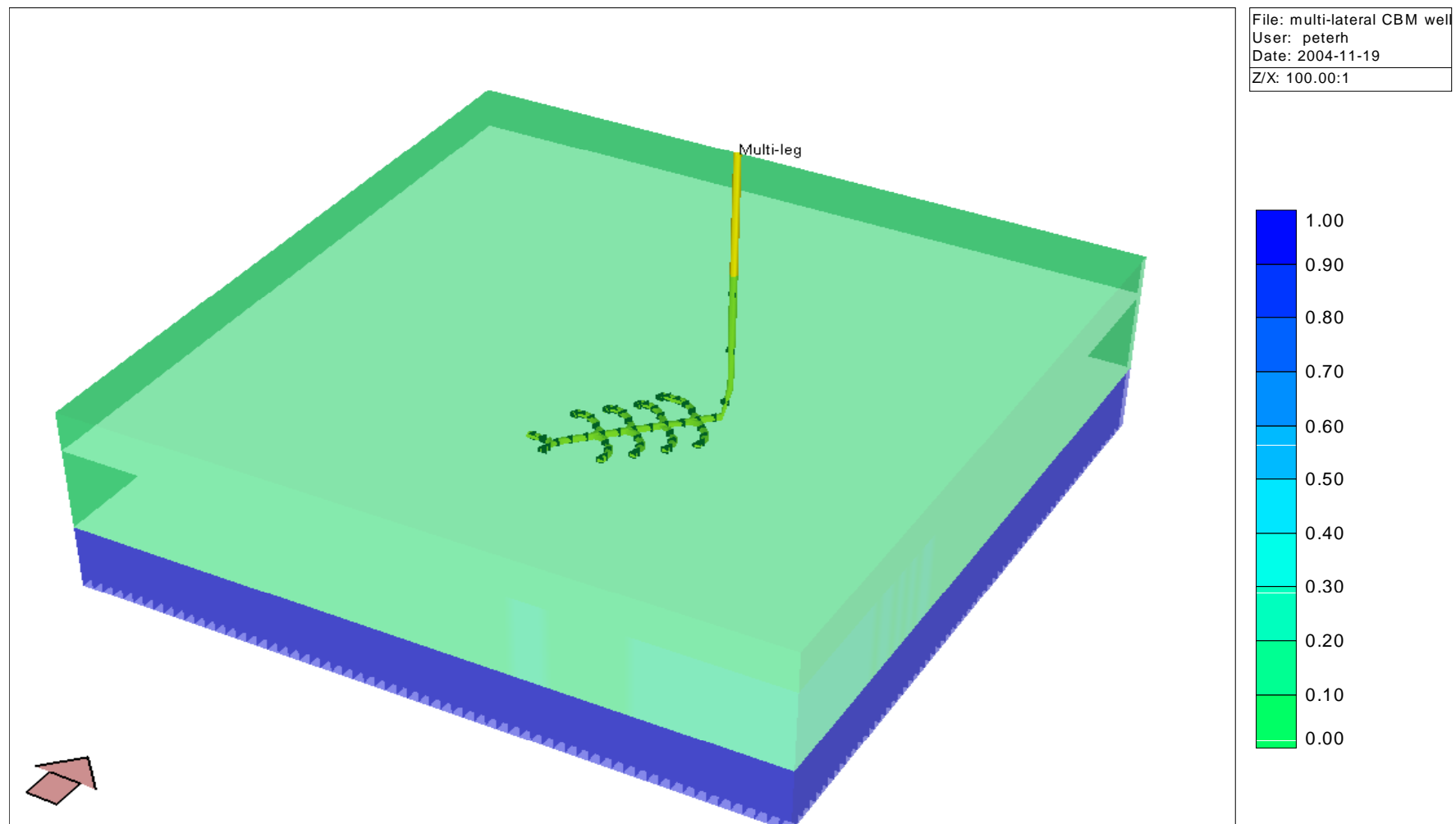
- **64 x 64 x 3 网格系统**
- **孔隙度 (裂缝) – 0.005**
- **渗透率 – 20 md**
- **裂缝间距0.1到0.5 meter**

不同完井模拟

- 煤层密度– 1.45 g/cc
- 含水饱和度- 100 %, 压力6.1 Mpa
- 分支井总长– 1987 meters
- 约束条件：产气量25000 m³/d, 产水量75 m³/d , 井底压力300 Kpa 。

不同完井模拟

CartesianModel-1
Water Saturation - Fracture 1996-01-01



□ 多分支井的优点:

- ◆ 增加了总的气液产量
- ◆ 快速排水
- ◆ 较大的压降可以更容易实现解吸附
- ◆ 提供更大的扩散面积
- ◆ 提供流体流动通道
- ◆ 增加总的排水面积
- ◆ 大多数井为裸眼完井

□ 洞穴井模拟

- 双孔模型
- 裂缝代表节理和洞穴
- 裂缝的孔隙度 > 90 %
- 用户定义洞穴的尺寸

不同完井模拟

- 径向模型 **10 x 1 x 3**
- 煤层厚度~ **6 meters**
- 高孔隙度区域来代表洞穴 **> 0.98**
- 洞穴直径接近 **9 meters**

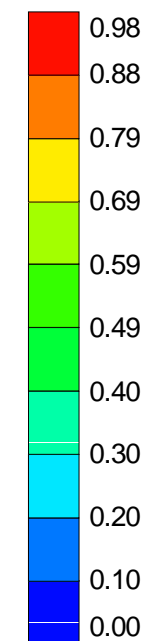
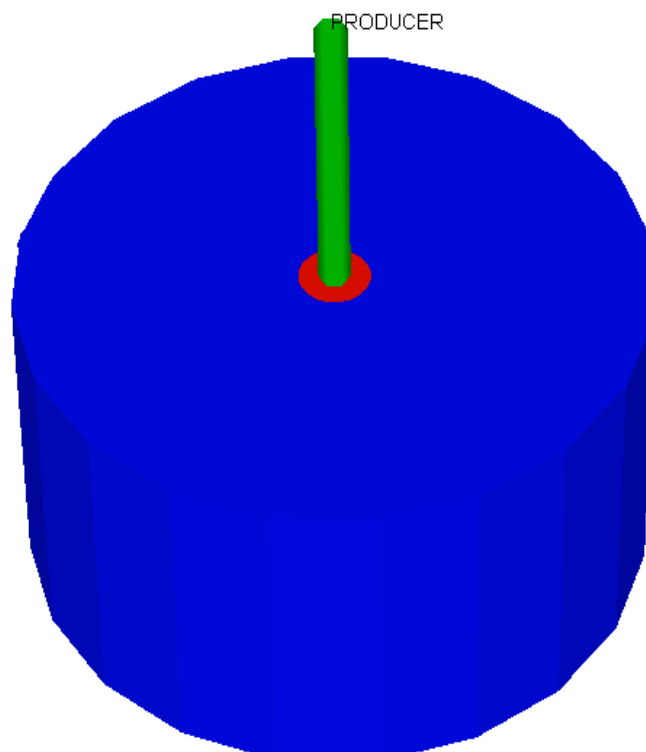
不同完井模拟

- ❑ 孔隙度（裂缝） – **0.005 (Non –Cavity zone)**
- ❑ 渗透率（裂缝） – **4 md**
- ❑ 渗透率 (洞穴) – **10 Darcy**
- ❑ 裂缝密度 – **0.2 meter**
- ❑ 压力 **7.65 Mpa**
- ❑ 初始含水饱和度**0.99**

不同完井模拟

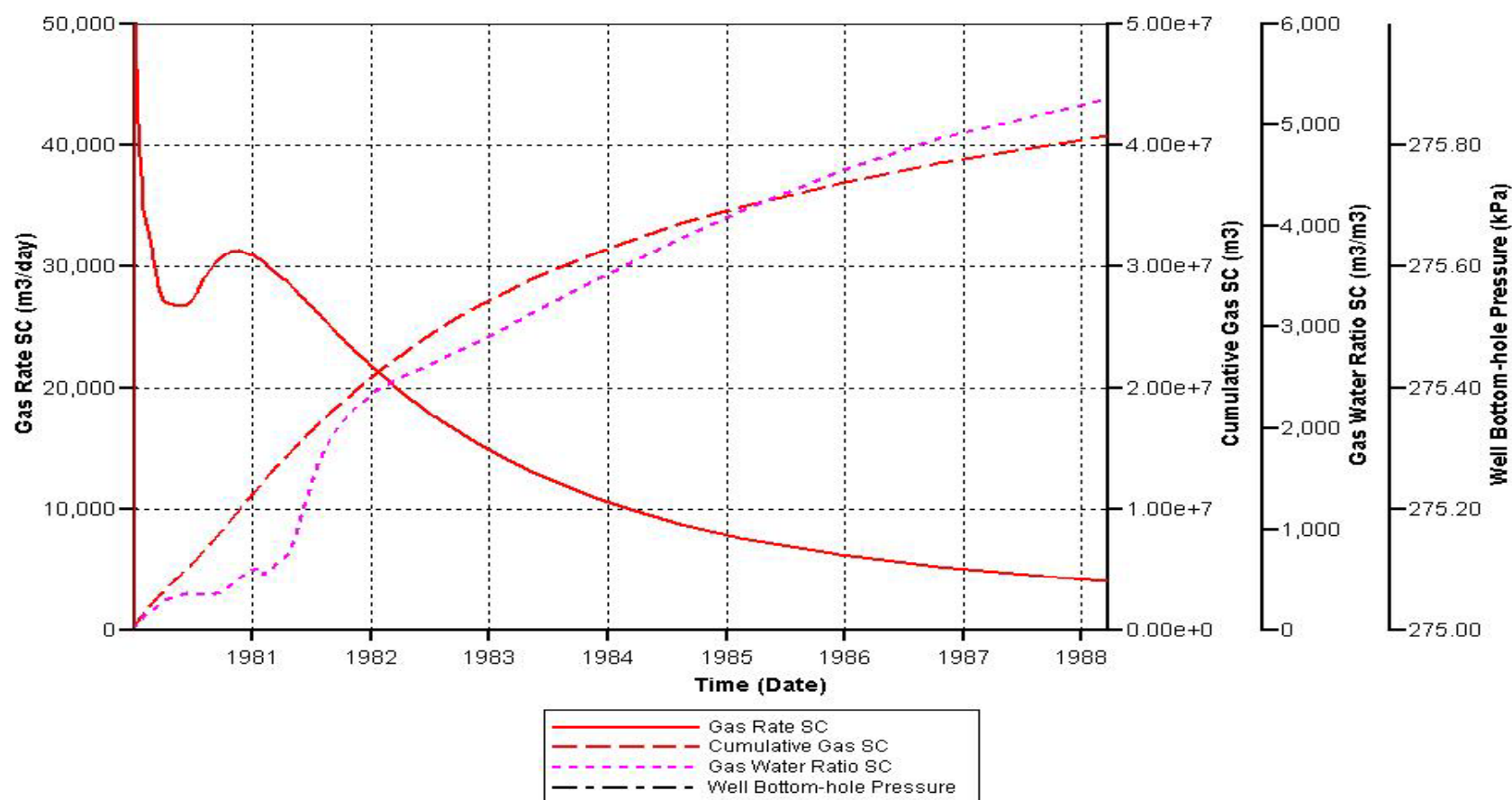
Primary Production (Single Well), with 8
Porosity - Fracture 1980-01-01

File: Cavity CBM well.irf
User: peterh
Date: 2004-11-24
Z/X: 92.00:1



不同完井模拟

Primary Production (Single Well), with 8
PRODUCER cavity CBM well.irf

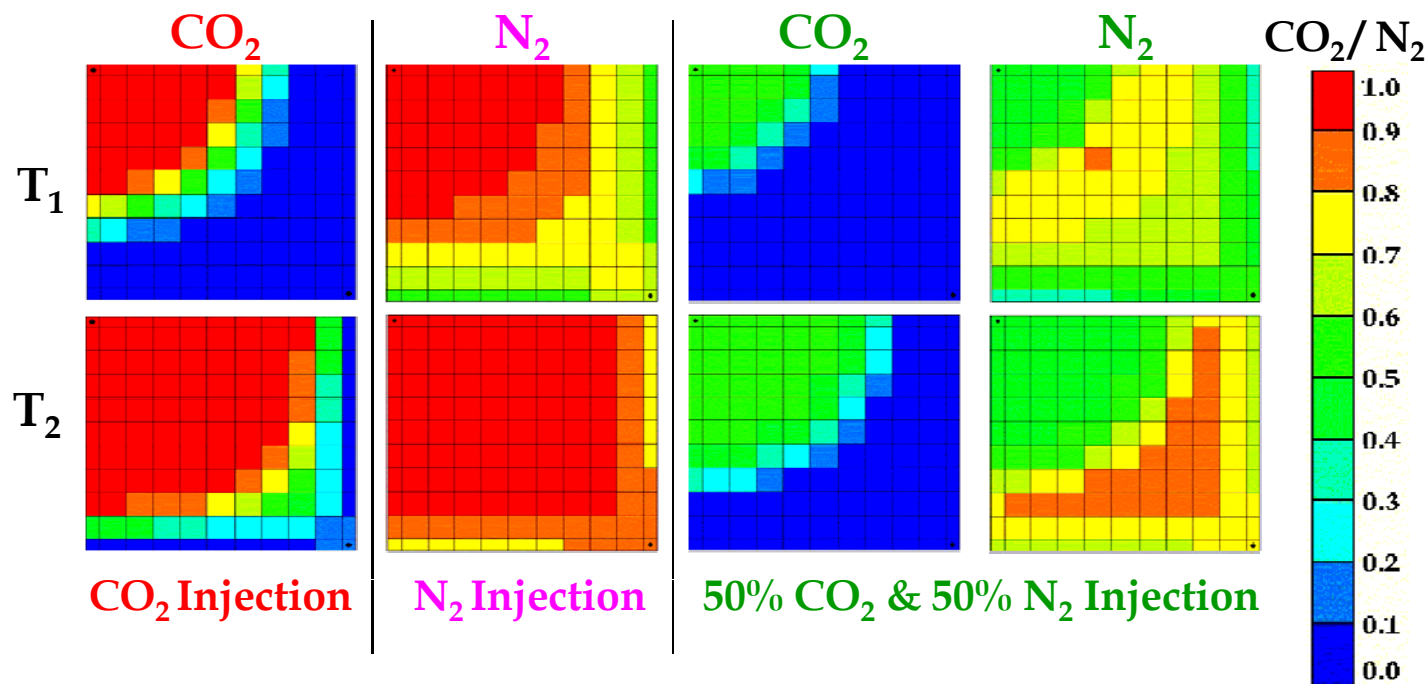


□ 洞穴井的应用

- ◆ 可以用来模拟开放矿井的排气过程
- ◆ 创建全网格系统来代表开放矿井方案
- ◆ 矿井排气计算
- ◆ 可以确定新矿井或者老矿井的总的气体解吸附时间
- ◆ 避免不必要的气体从基质到坑洞的迁移

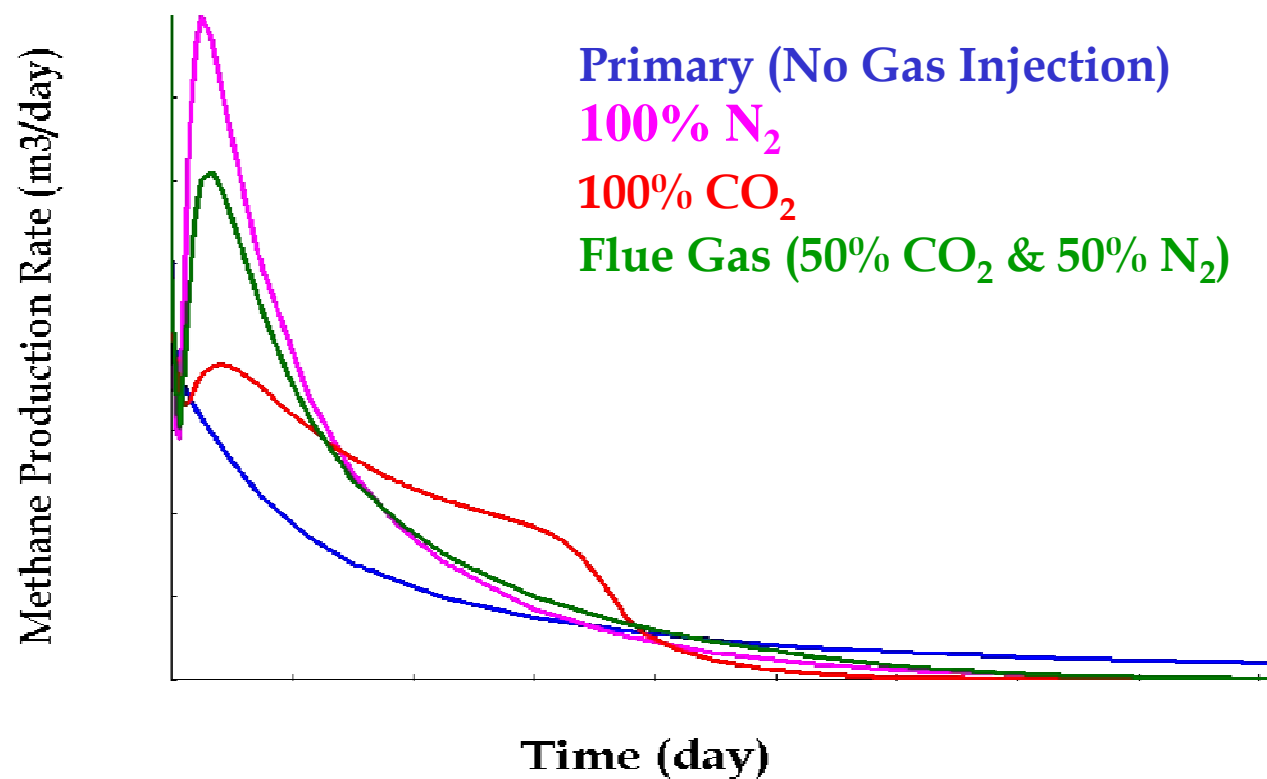
ECBM 实例：5点注入法学习

□ 注水剖面



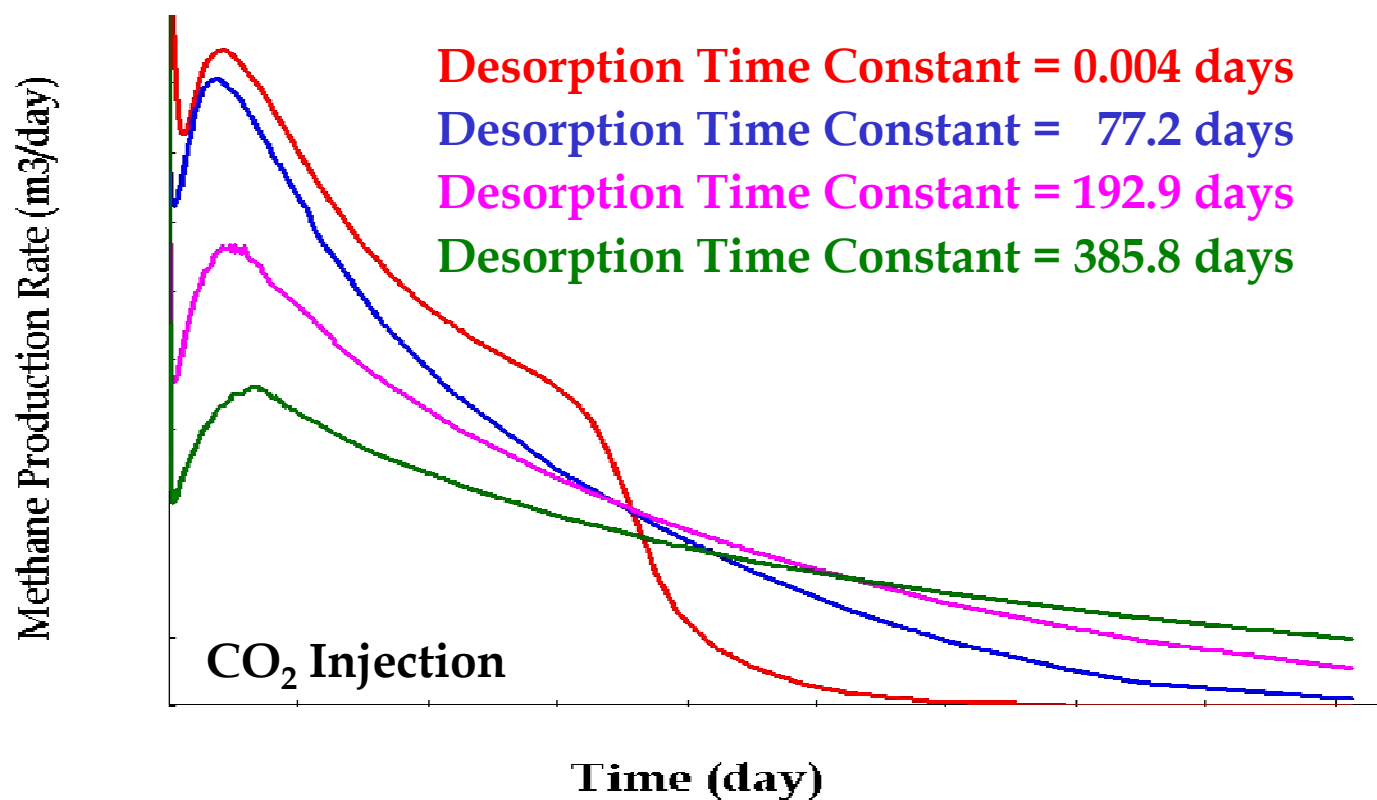
5点注入法学习

□ 5点注入法模拟结果



5点注入法学习

□ 不同解吸附时间的效果



□ 阐述了多功能组分模型**GEM**的功能

- ◆ 不同类型的吸附模拟
- ◆ 标准**CBM**数据输入的扩散模拟
- ◆ 结合所有的物理现象和运算来描述煤层的流动过程
- ◆ 重要的岩石力学模拟
 - 解吸附作用造成的基质收缩
 - 吸附和节理压力降低造成的基质膨胀

总结

- ❑ 可以在钻孔之前模拟不同的开发计划
- ❑ 模拟器可以提供利益最大的和最优的煤层开采方案
- ❑ 数值模拟可以为**CBM**公司提供最精细、准确的预测
- ❑ 先进的模拟可以提供砂岩、页岩和煤层气结合的模拟

总结

- 砂岩内流动为达西流动
- 砂岩网格可以设定为无气体含量和解吸附
- 裂缝网格代表流体在砂岩中移动
- 指定基质部分孔隙度为**0**，没有吸附
- 在砂岩中，地下总的流体量仅由裂缝体积计算