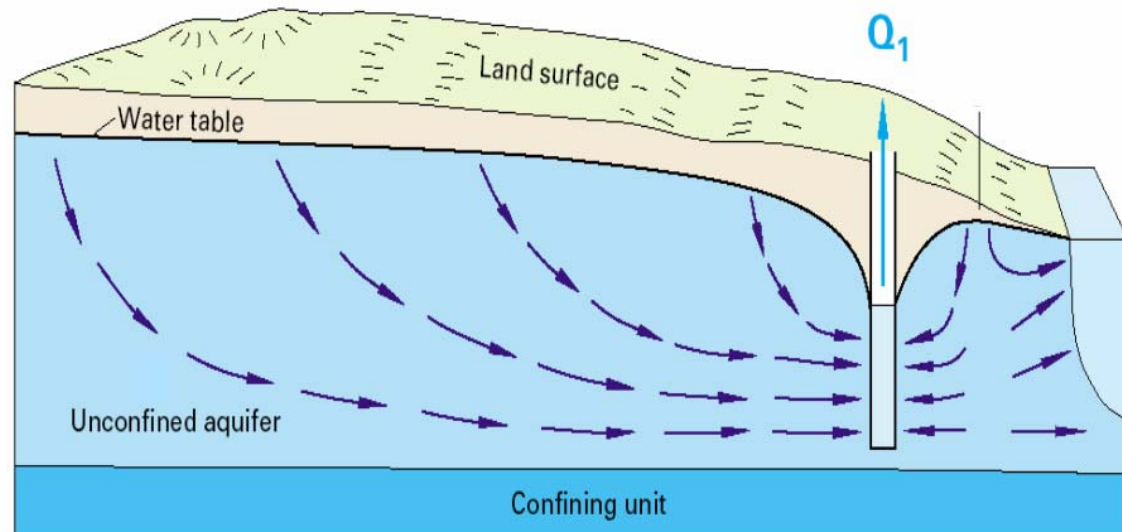


地下水流数值模拟的基本理论及应用

王旭升 博士

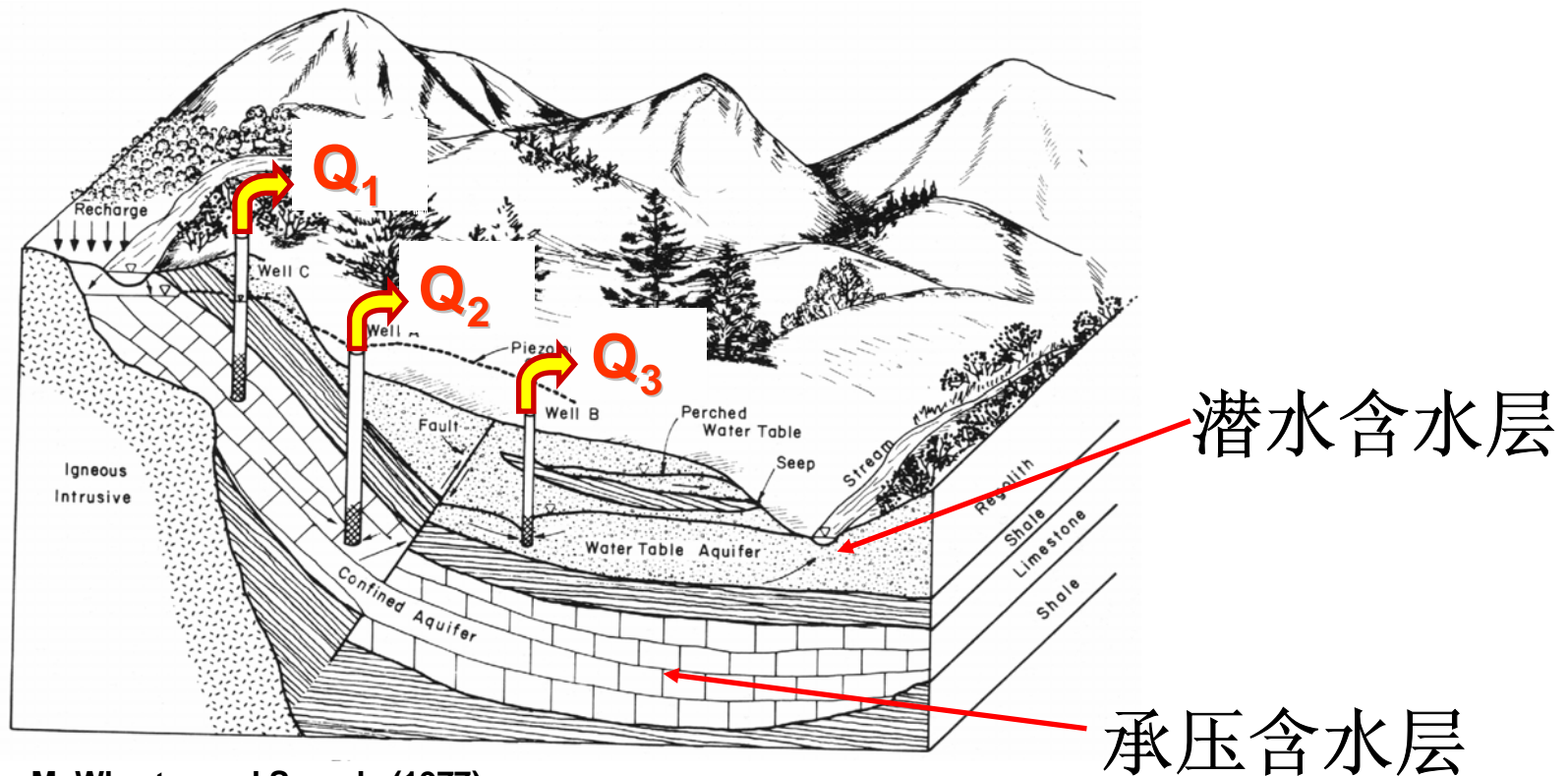


目 录

1. 地下水系统及其概念模型
2. 地下水流的数学描述与参数
3. 三维有限差分模型与**MODFLOW**
4. 模块及其作用
5. **VMODFLOW**的应用

1. 地下水系统及其概念模型

地下水系统：含水层+补给区+径流区+排泄区+开采井

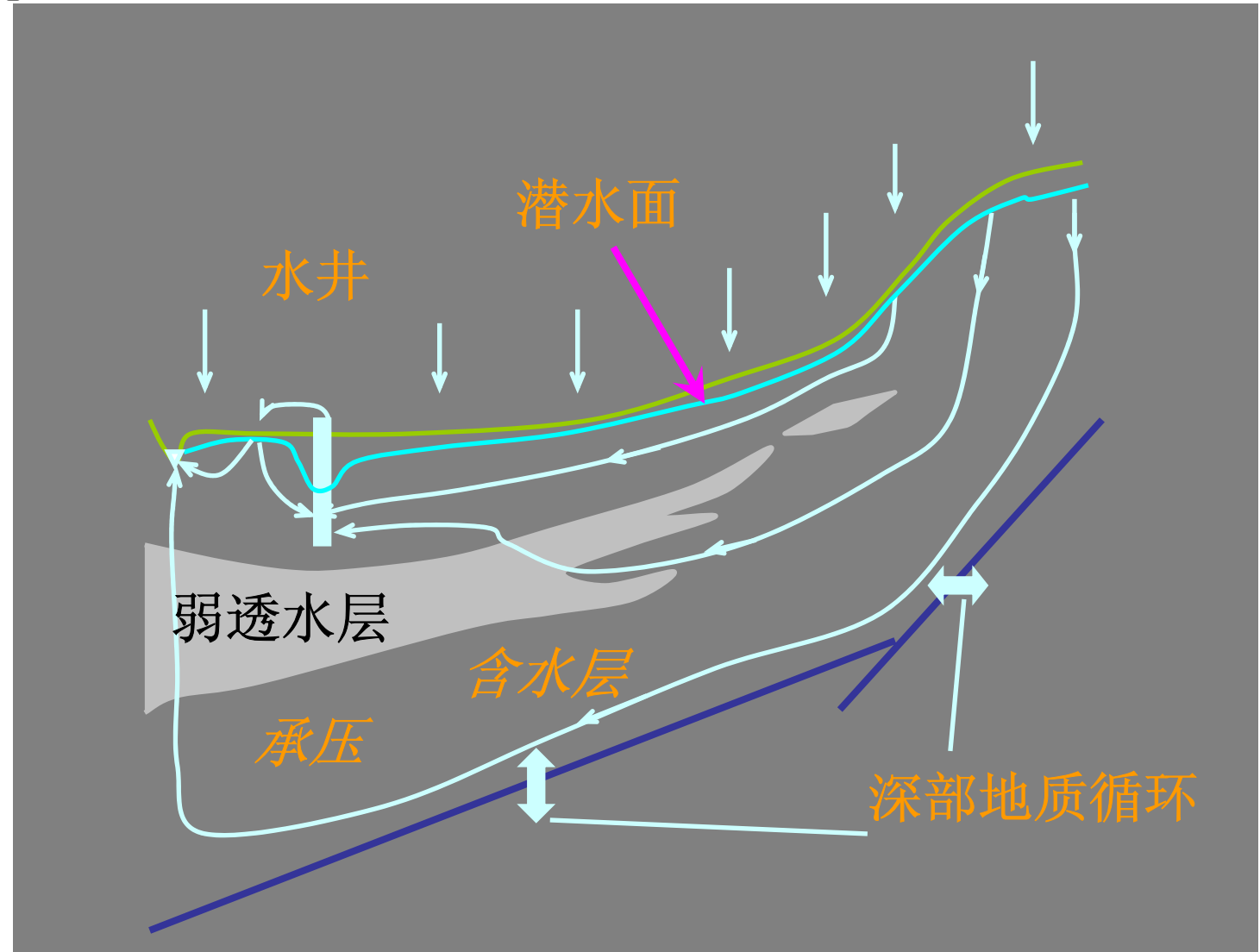


McWhorter and Sunada (1977)

1. 地下水系统及其概念模型

●地下水系统

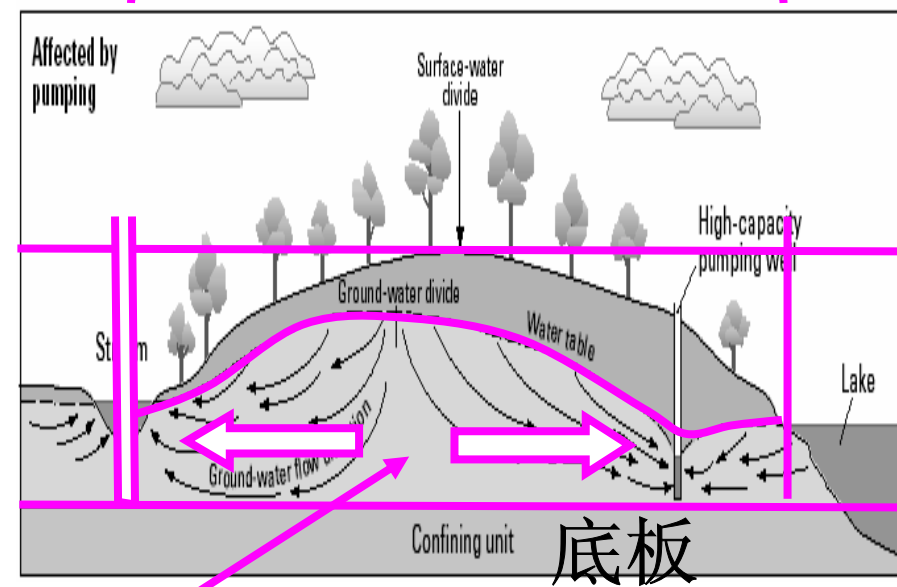
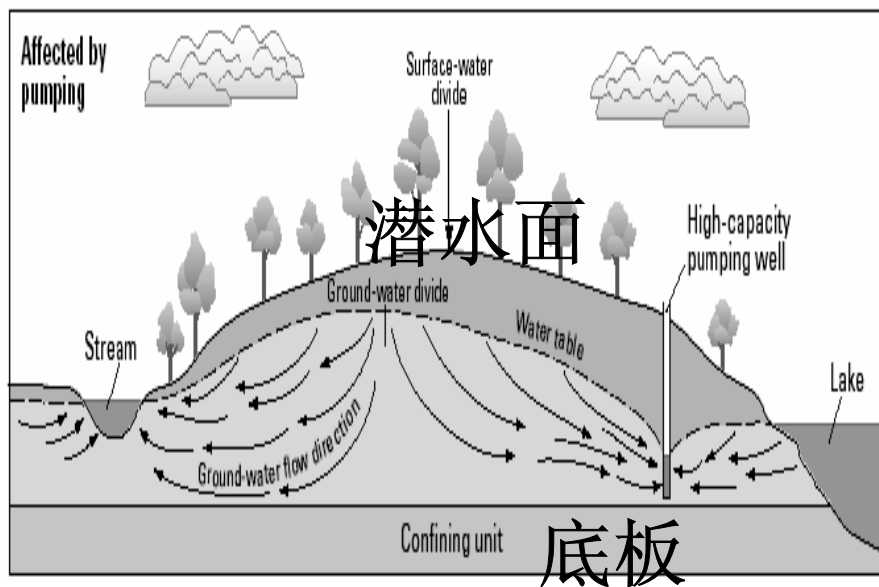
地层
透水性
边界



1. 地下水系统及其概念模型

●含水层概念模型：潜水含水层

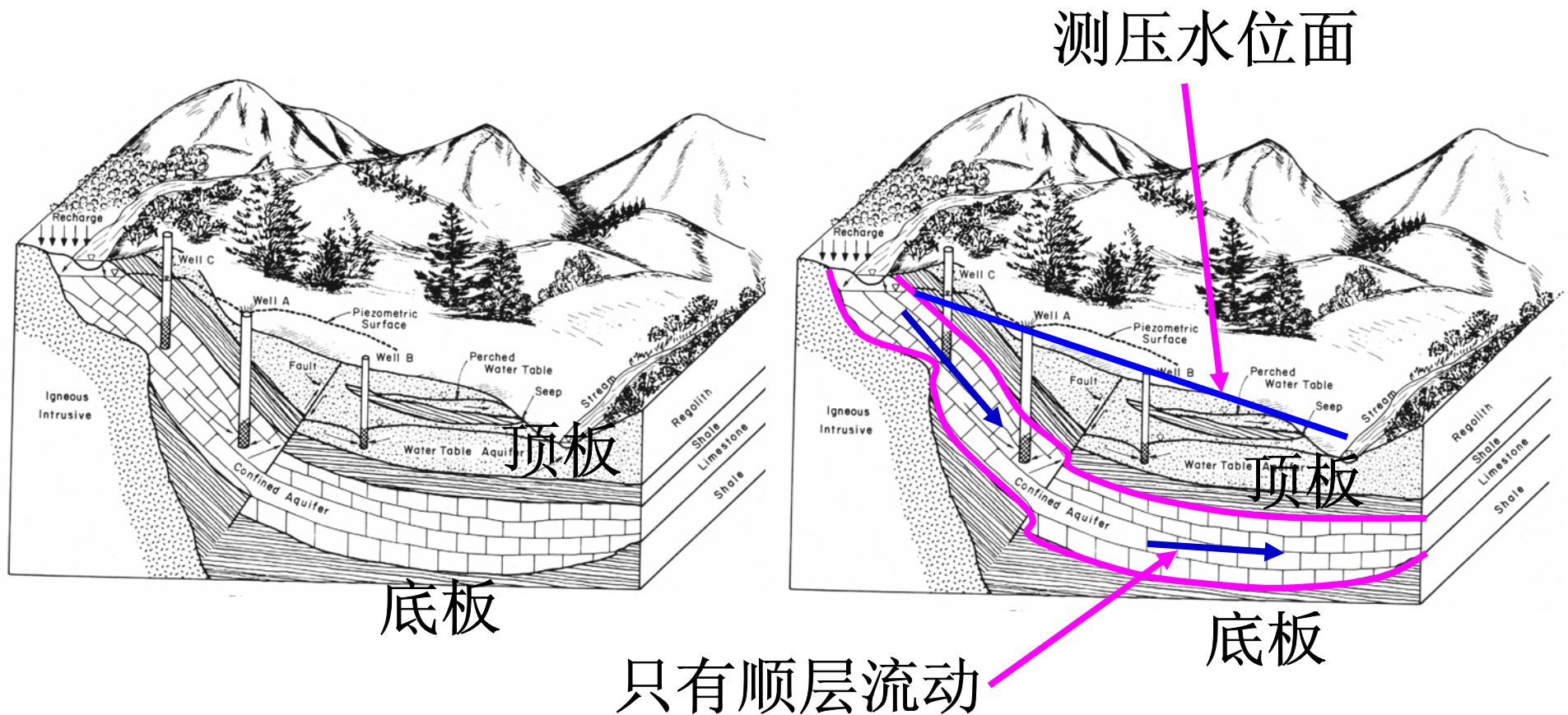
模型范围



只有水平流动

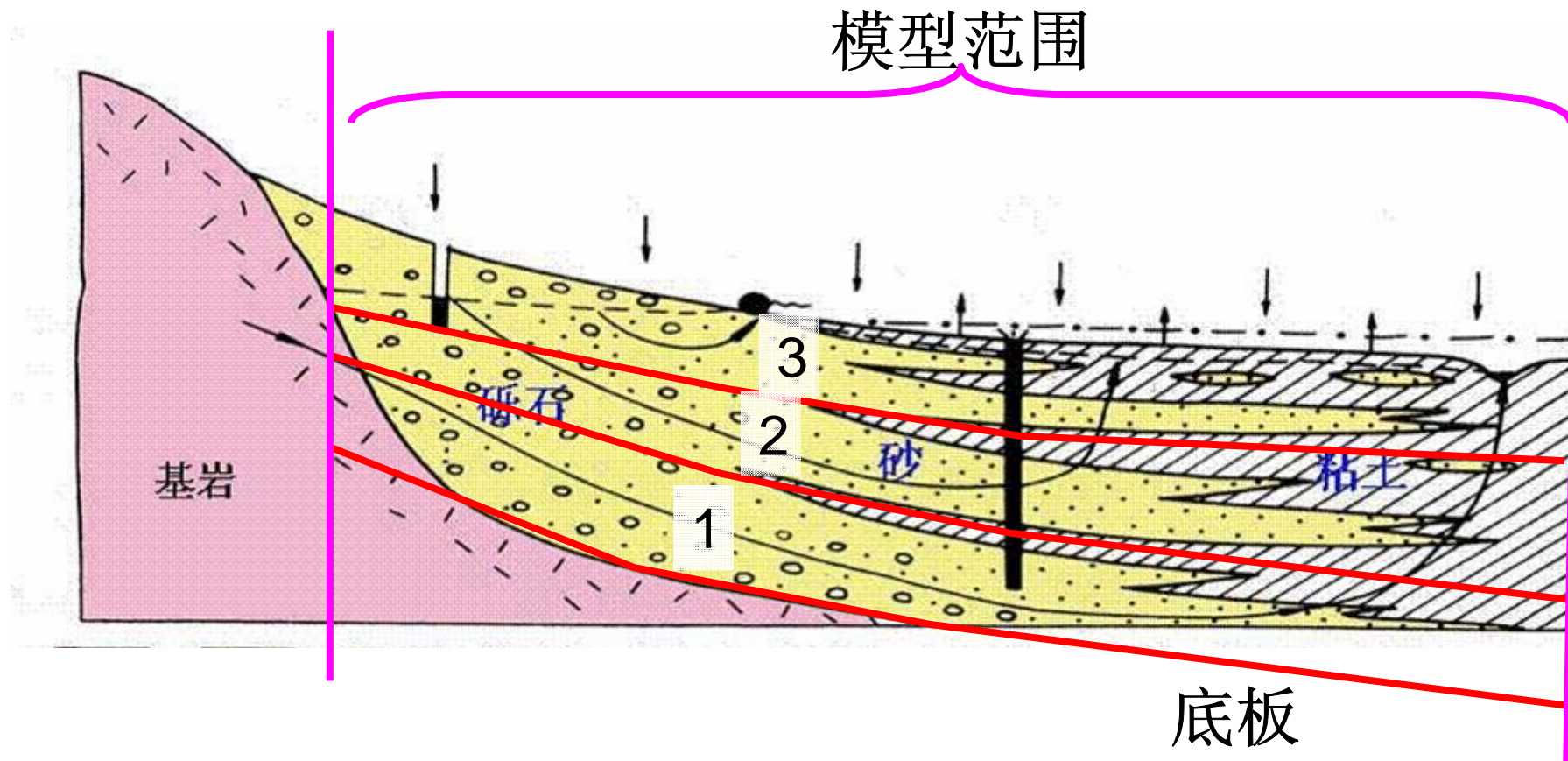
1. 地下水系统及其概念模型

●含水层概念模型：承压含水层



1. 地下水系统及其概念模型

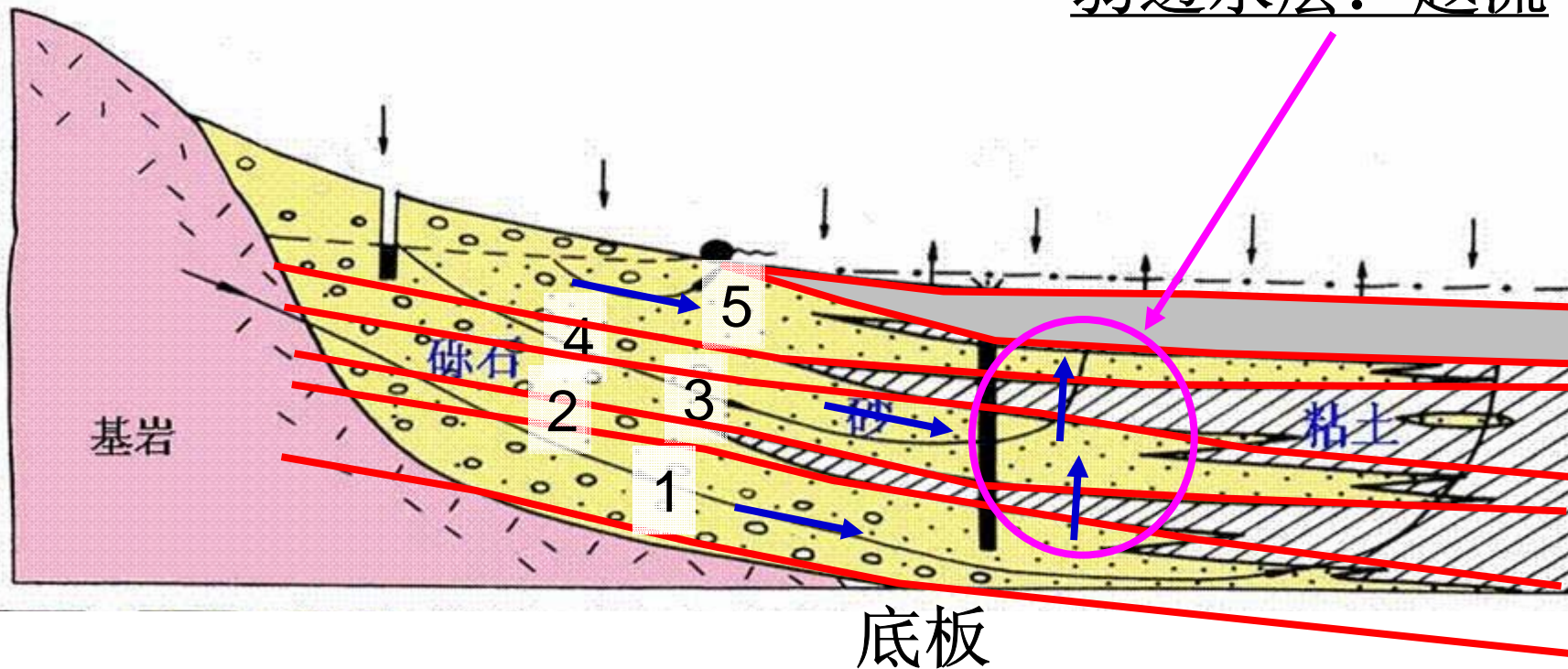
- 含水层概念模型：多个含水层



1. 地下水系统及其概念模型

- 含水层概念模型：多个含水层

弱透水层：越流



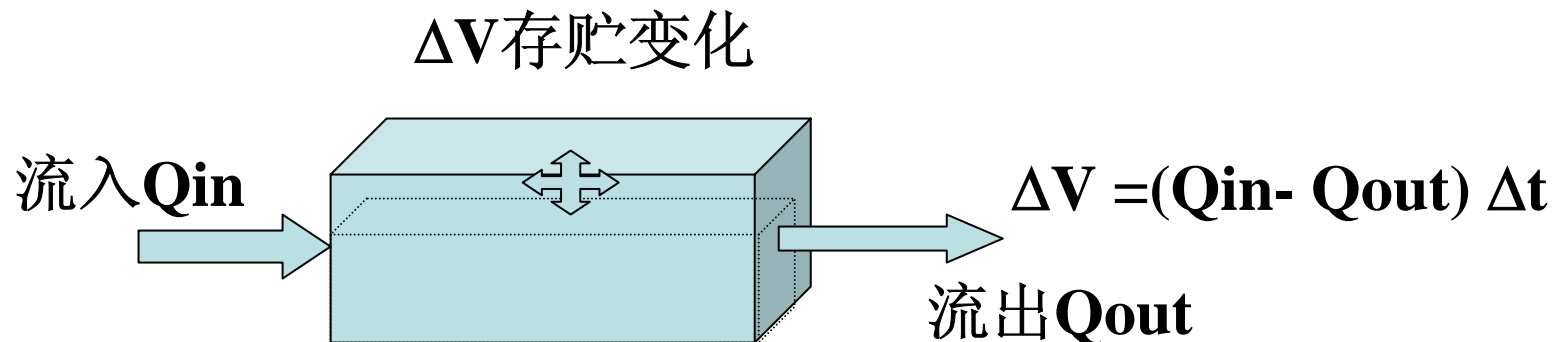
2. 地下水流的数学描述与参数

* 地下水的水力学

Darcy (达西)定律: Darcy 流速

$$H = z + \frac{p}{\gamma_w} \quad V = -KI = -K \frac{\Delta H}{\Delta l}$$
$$= z + h \quad V_x = -K_x \frac{\partial H}{\partial x}, V_y = -K_y \frac{\partial H}{\partial y}$$

水均衡



2. 地下水流的数学描述与参数

* 潜水运动方程

Boussinesq方程

入渗补给

非饱和带

饱和带

隔水底板

h

M

z

渗透系数

饱和厚度

补给强度

给水度

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K(h-z) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \varepsilon = \mu \frac{\partial h}{\partial t} = 0$$

Dupuit方程

2. 地下水流的数学描述与参数

* 承压水运动方程

方向渗透系数

含水层厚度

补给强度

贮水系数

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_{xx} M \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_{yy} M \frac{\partial H}{\partial y} \right] + \varepsilon = S \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \text{ 稳定流}$$

2. 地下水流的数学描述与参数

* 承压水运动方程

导水系数

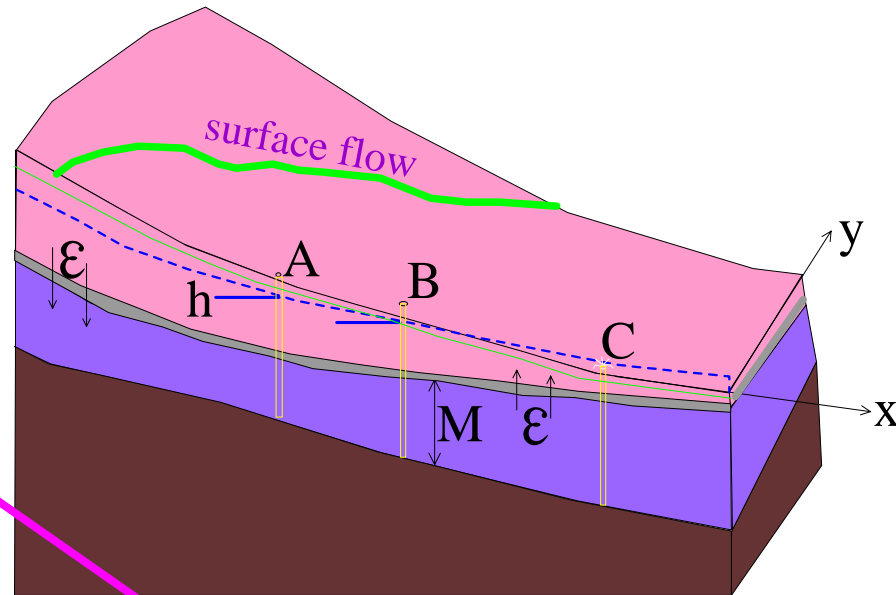
$$T_{xx} = K_{xx}M$$

$$T_{yy} = K_{yy}M$$

贮水系数

$$S = S_s M$$

贮水率



$$\frac{\partial}{\partial x} \left[T_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[T_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right] + \varepsilon = S_s M \frac{\partial H}{\partial t}$$

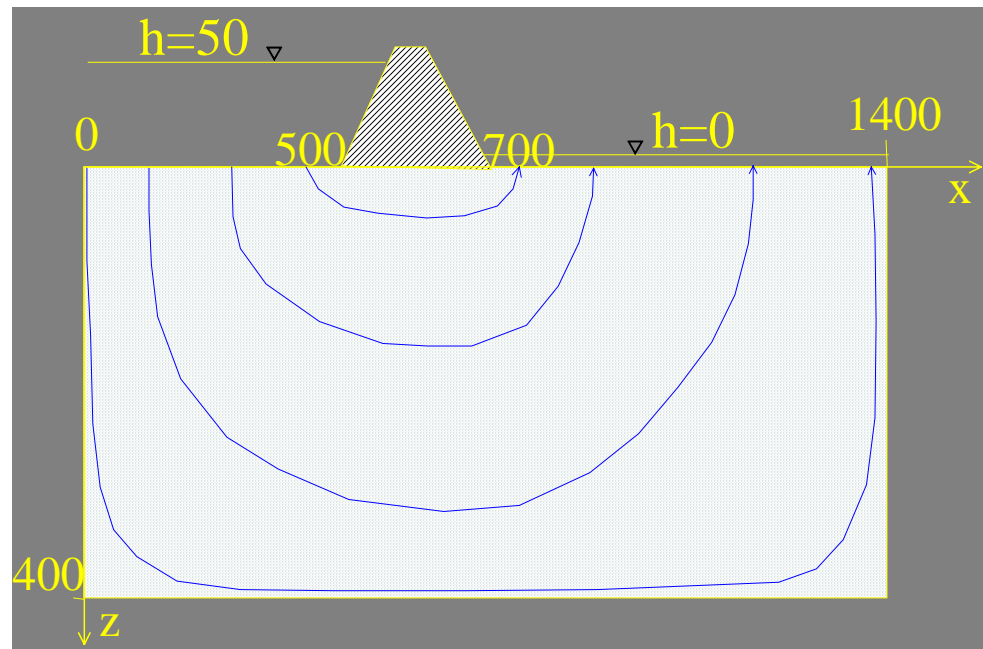
2. 地下水流的数学描述与参数

* 三维渗流方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[K_{xx} \frac{\partial H}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_{yy} \frac{\partial H}{\partial y} \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{zz} \frac{\partial H}{\partial z} \right] + W \\ & = S_s \frac{\partial H}{\partial t} \end{aligned}$$

体积源汇项

贮水率



2. 地下水流的数学描述与参数

- 定解条件

- 边界条件

模型边界的水头、流量。

(1) 一类边界, A

定水头边界:

$$h_A = h_1(x, t)$$

(2) 二类边界, B

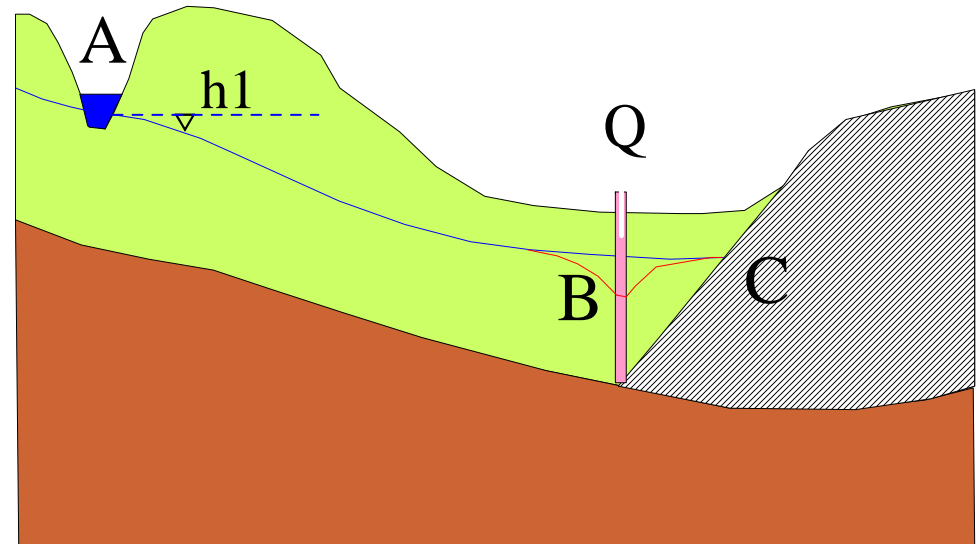
定流量边界:

$$kM \left. \frac{\partial h}{\partial n} \right|_B = T \left. \frac{\partial h}{\partial n} \right|_B = -\frac{Q}{2\pi r_w}$$

隔水边界 (C) —— 流量为零的二类边界。

- 初始条件——非稳定流问题

t=0时地下水系统或模型的水头分布

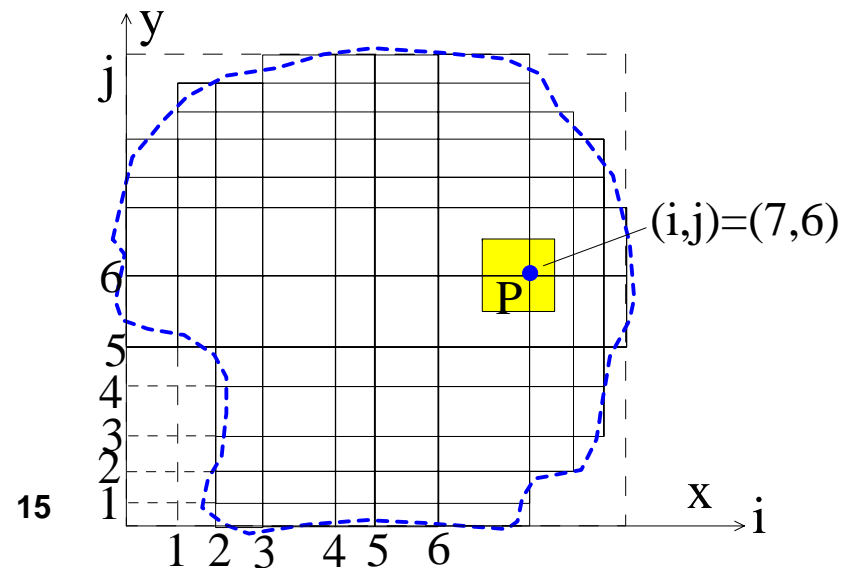
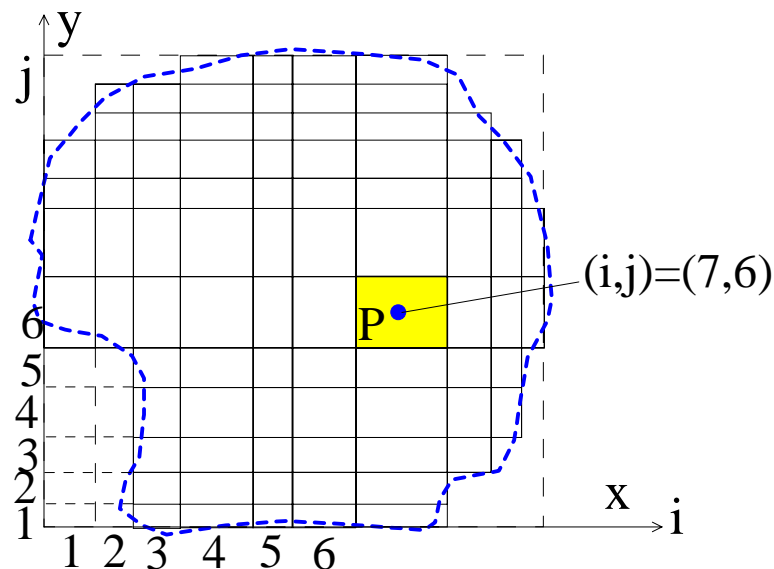


3. 三维有限差分模型与MODFLOW

**地下水流的数值法

用有限的离散点组成网格代替连续的渗流空间，把时间分成有限数目的小段，将微分方程及其定解条件转化成网格上的代数方程组，通过求解代数方程组获得不同时刻水头在离散点上的近似值。

网格剖分——空间离散化



3. 三维有限差分模型与MODFLOW

****地下水流的数值法**

有限差分法

有限单元法

边界元法



MODFLOW

3. 三维有限差分模型与MODFLOW

- 代码 Fortran程序

MODFLOW, -83, -88, -96
-2000 (new)

(McDonald & Harbaugh)

MT3D(Zheng, 1990)

- **MT3DMS**

PEST(Doherty et al, 1994)

UCODE (Poeter & Hill,
1998)

Packages(模块)

- 软件 Windows界面

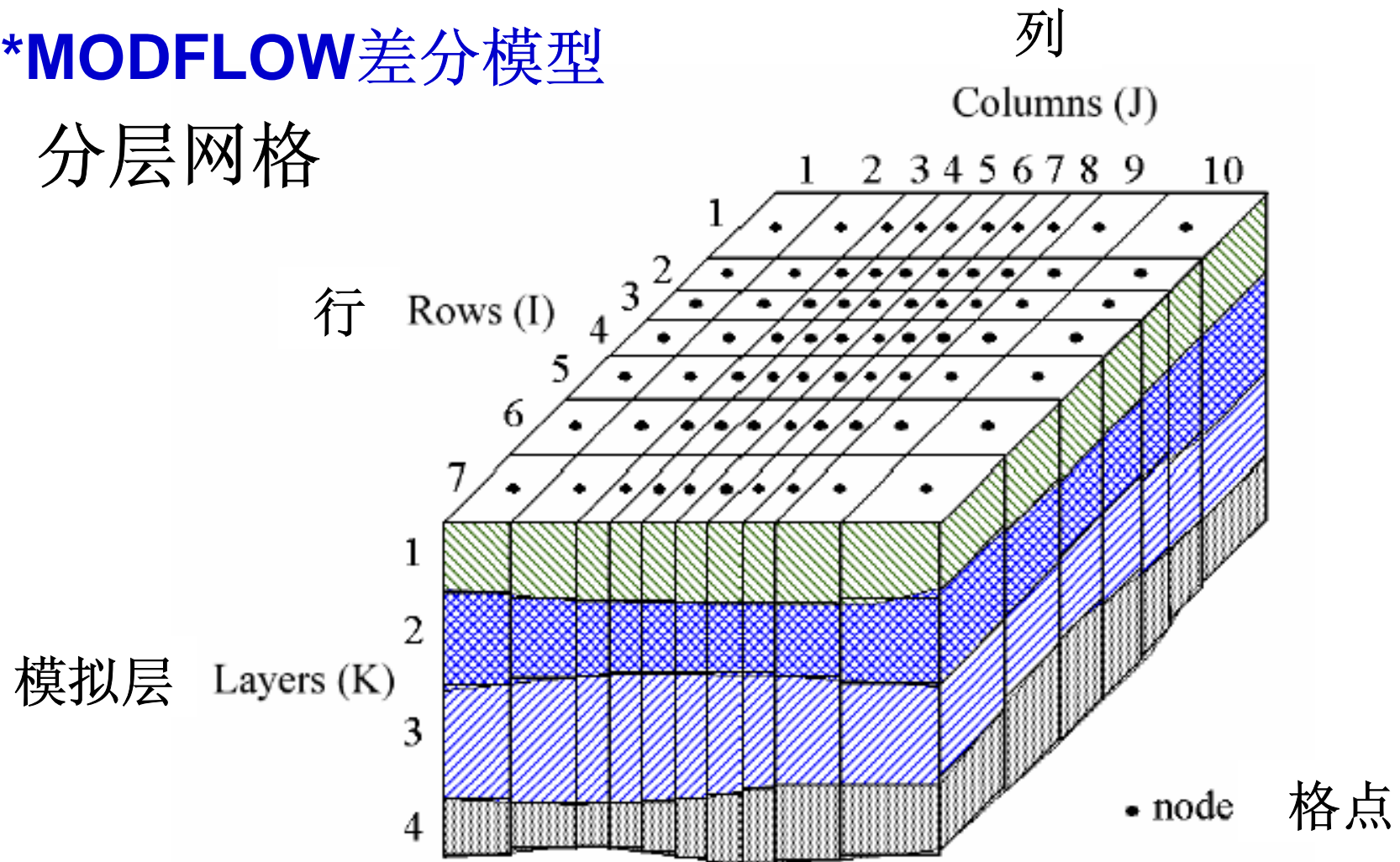
Visual Modflow

VMODFLOW中文版

3. 三维有限差分模型与MODFLOW

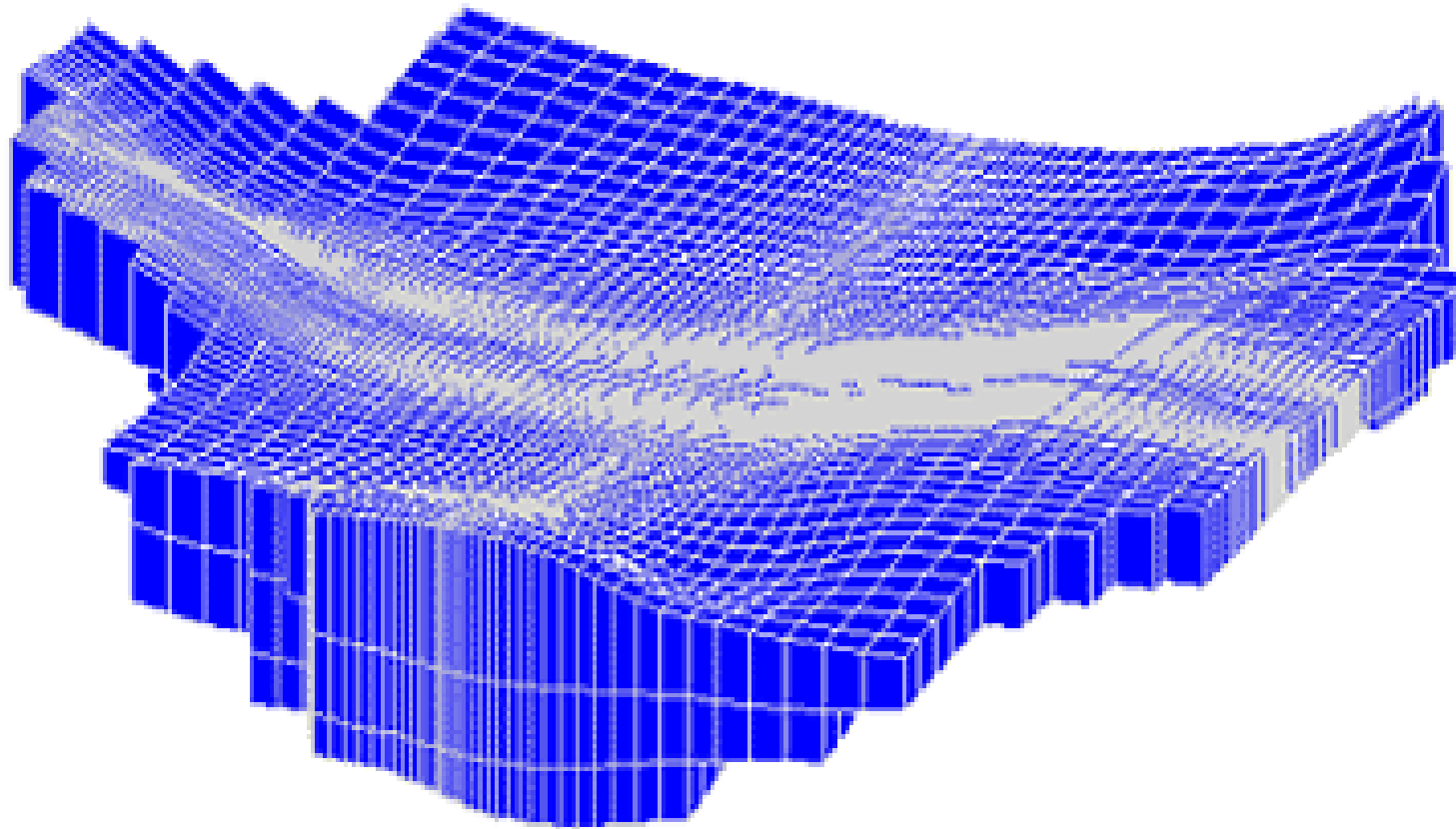
****MODFLOW差分模型**

分层网格



3. 三维有限差分模型与MODFLOW

**MODFLOW差分模型

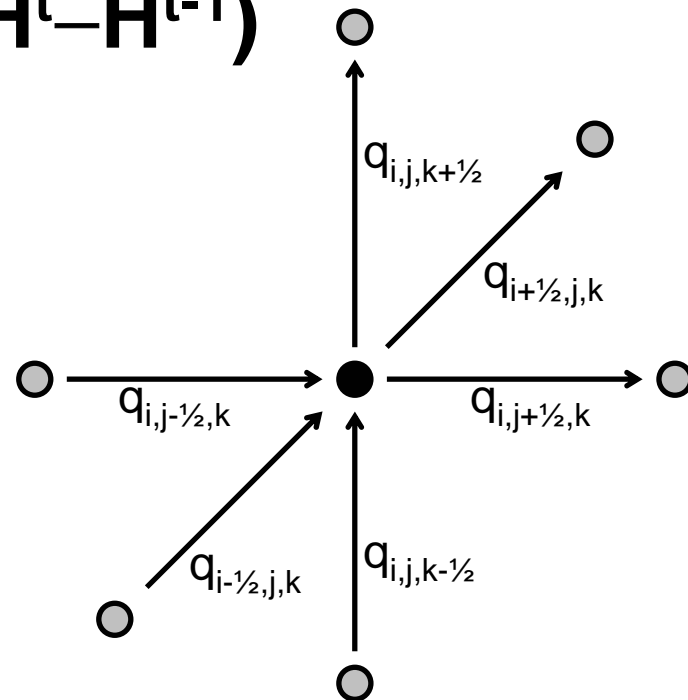
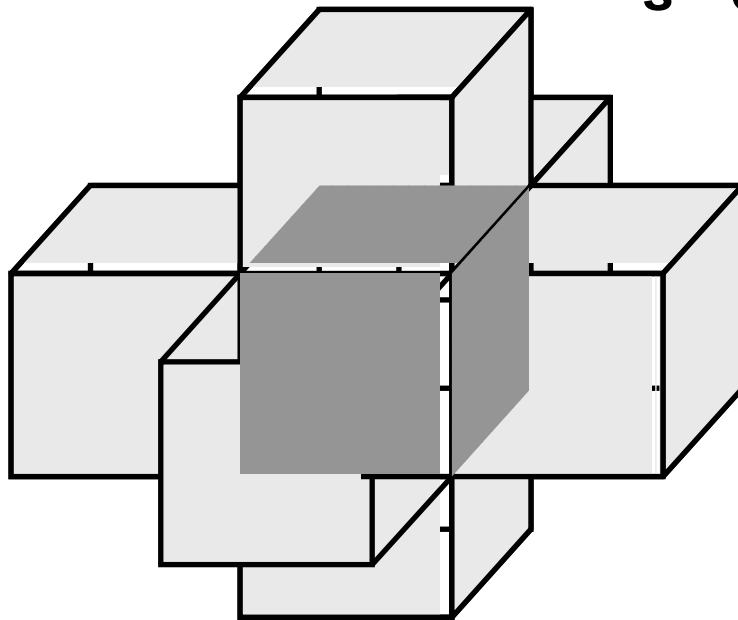


3. 三维有限差分模型与MODFLOW

**MODFLOW差分模型

差分方程

$$(q_N + q_S + q_E + q_W + q_U + q_L)\Delta t + \varepsilon A = S_s V_{\text{cell}}(H^t - H^{t-1})$$

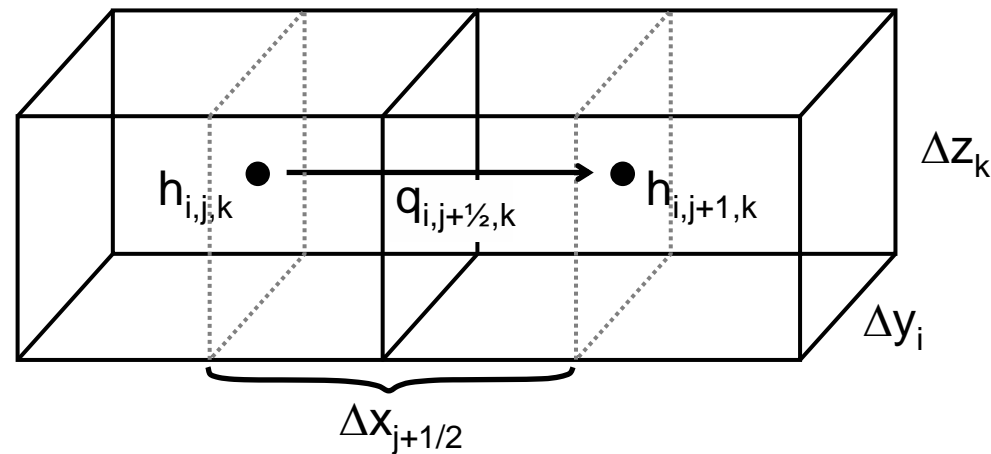


3. 三维有限差分模型与MODFLOW

**MODFLOW差分模型

差分方程：侧向流量

$$q_{i,j+1/2,k} = \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) A = K_{i,j+1/2,k} \frac{h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}}{\Delta x_{j+1/2}} \Delta y_i \Delta z_k$$

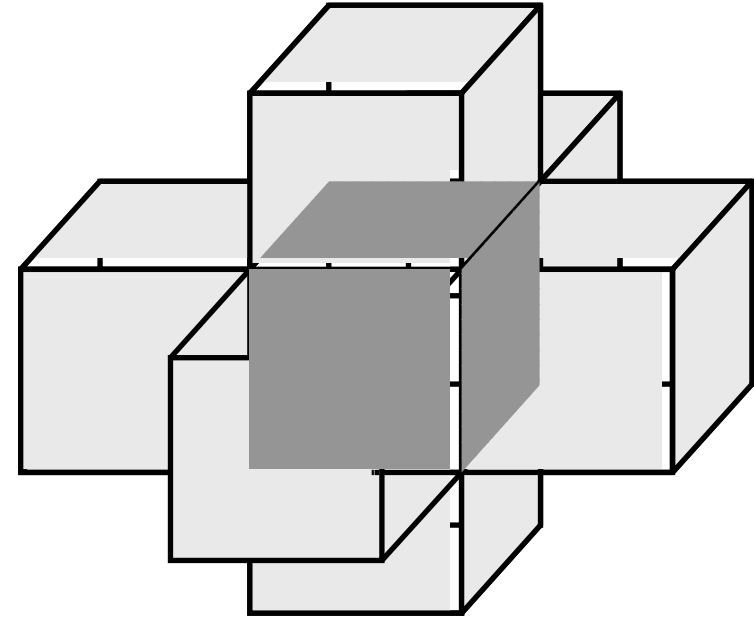


3. 三维有限差分模型与MODFLOW

**MODFLOW差分模型

差分方程

$$q_{i,j+1/2,k} = CR_{i,j+1/2,k} (h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k})$$



$$\begin{aligned} \sum q_n = & CR_{i,j+1/2,k} (h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) + CR_{i,j-1/2,k} (h_{i,j,k} - h_{i,j-1,k}) \\ & + CR_{i+1/2,j,k} (h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}) + CR_{i-1/2,j,k} (h_{i,j,k} - h_{i-1,j,k}) \\ & + CR_{i,j,k+1/2} (h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}) + CR_{i,j,k-1/2} (h_{i,j,k} - h_{i,j,k-1}) \end{aligned}$$

3. 三维有限差分模型与MODFLOW

**MODFLOW差分模型

求解差分方程

$$[C]\{H^t\} + \{q_e\} = [S]\{H^t - H^{t-1}\}$$

$$[A]\{H^t\} = \{q\}$$

共轭梯度法(**PCG**);

分片超松弛迭代法(**SSOR**);

强隐式迭代法(**SIP**)

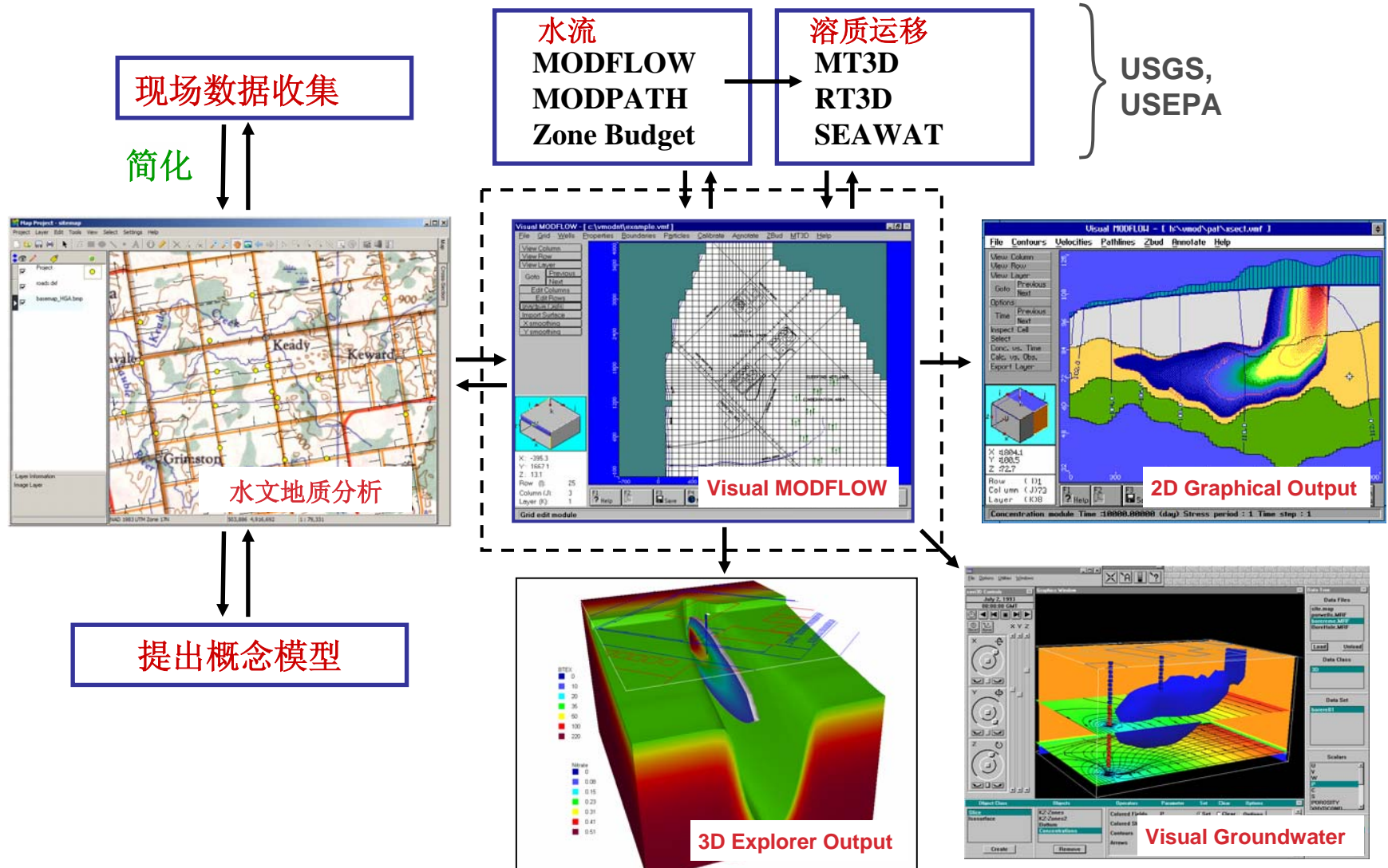
3. 三维有限差分模型与MODFLOW

**使用VMODFLOW建立模型

1. 准备数据资料（划分含水层，顶底板高度，渗透参数，存贮参数，初始地下水位）
2. 划分平面网格，输入顶、底板高度
3. 输入模拟层参数
4. 输入边界属性和模块参数
5. 是稳定流还是非稳定流
6. 非稳定流的初始水头分布
7. 运行模型，查看结果

3. 三维有限差分模型与MODFLOW

****使用VMODFLOW建立模型：水流和溶质运移**

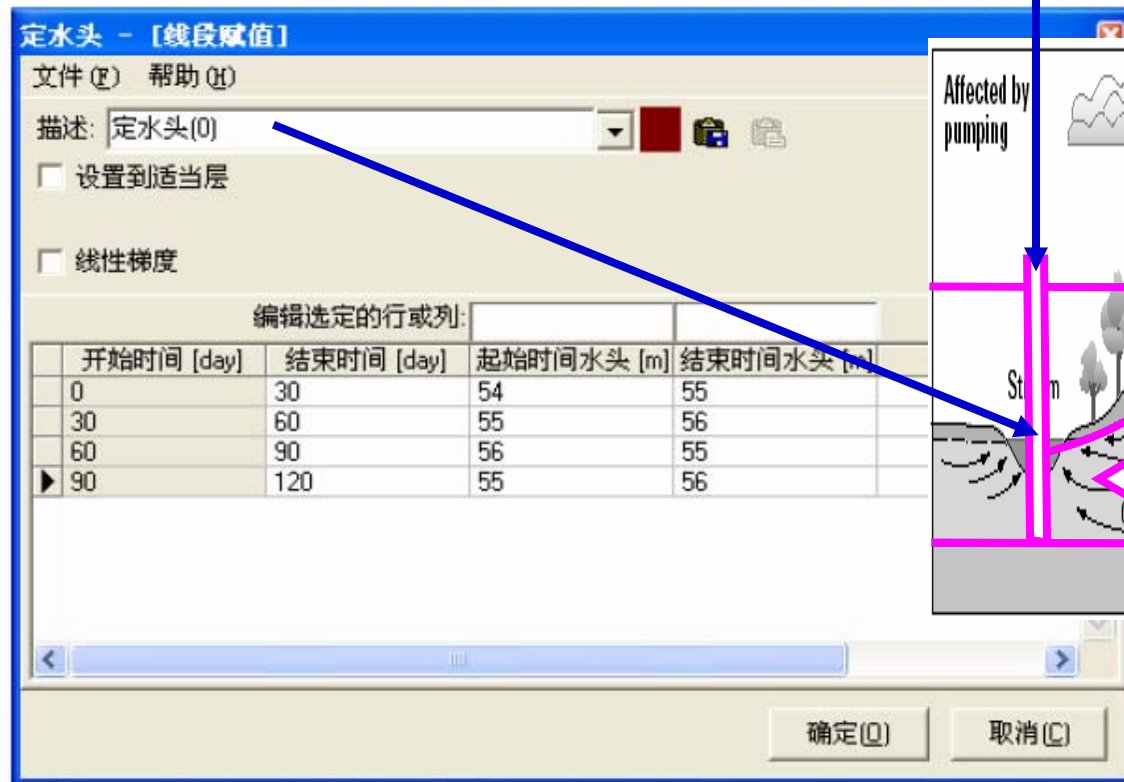


4. 模块及其作用

- 1.定水头边界(**CHD**)
- 2.变水头边界(**GHB**)模块
- 3.排水沟边界(**DRN**)模块
- 4.补给(**RCH**)模块
- 5.蒸散(**EVT**)模块
- 6.河流边界(**RIV**)模块
- 7.河网(**STR**)模块
- 8.抽水井(**WEL**)模块
- 9.干湿单元转化处理(**Re-wetting**)

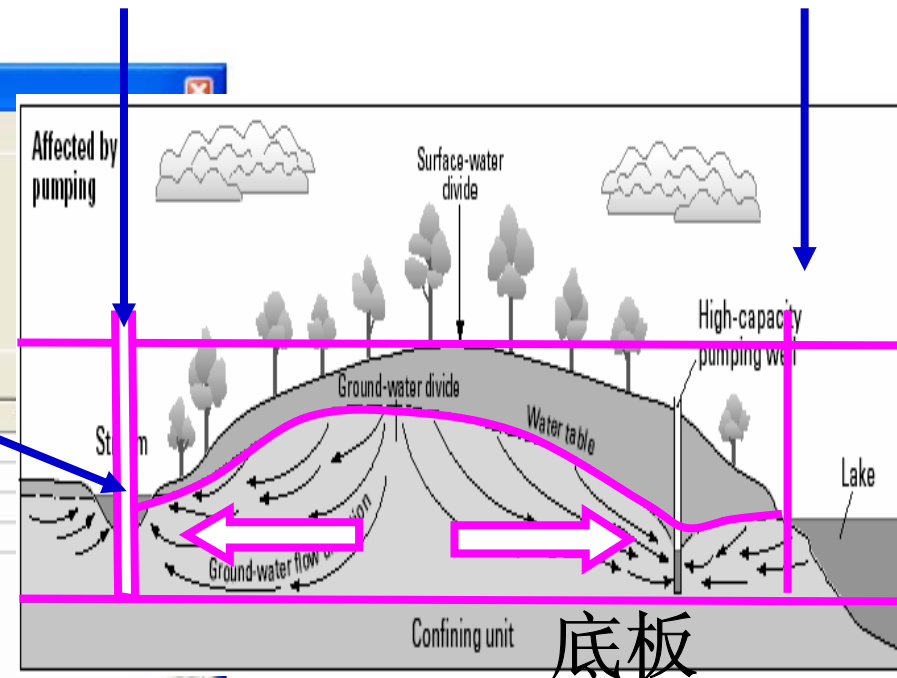
4. 模块及其作用

**定水头边界(CHD)



定水头(0)

定水头(1)

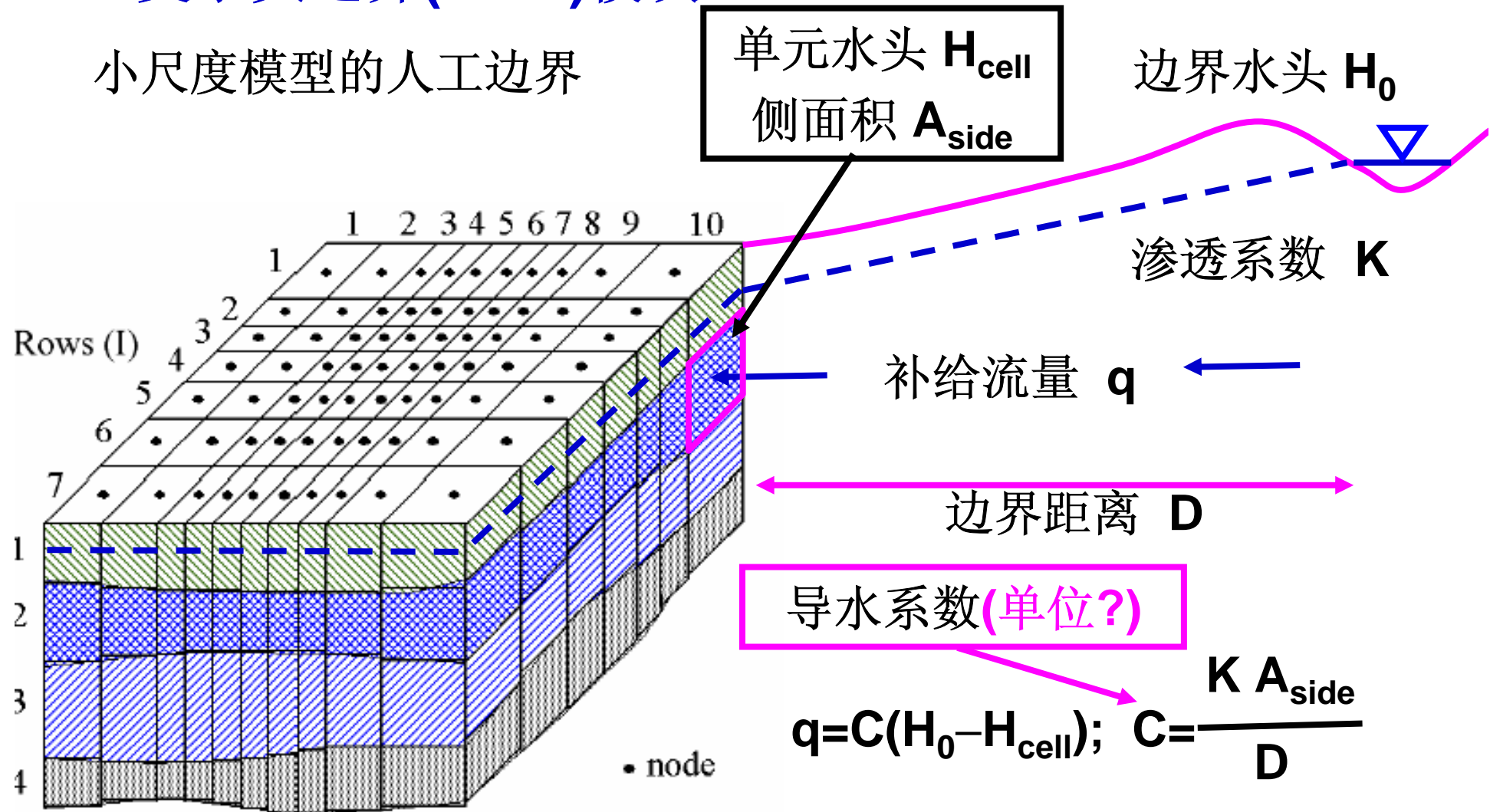


常用于河流、湖泊、海洋等
地表水体

4. 模块及其作用

**变水头边界(GHB)模块

小尺度模型的人工边界



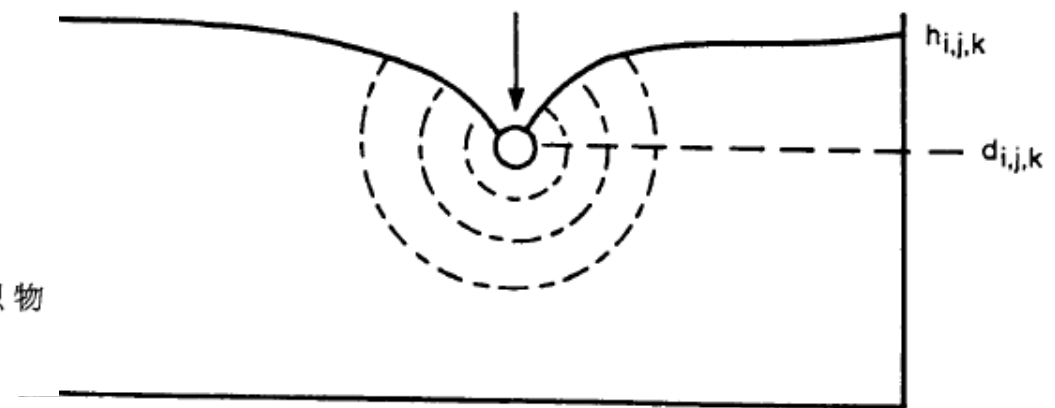
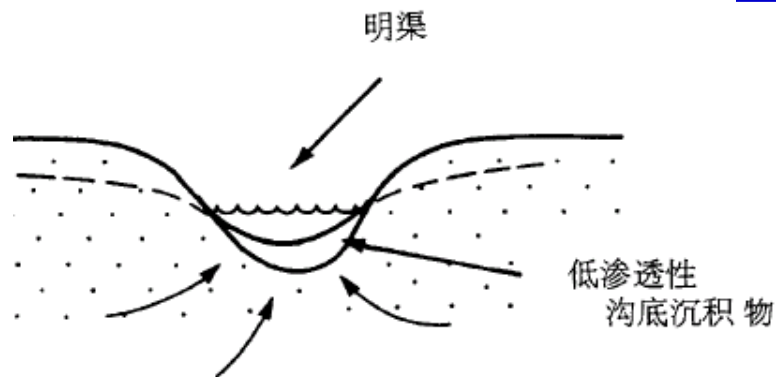
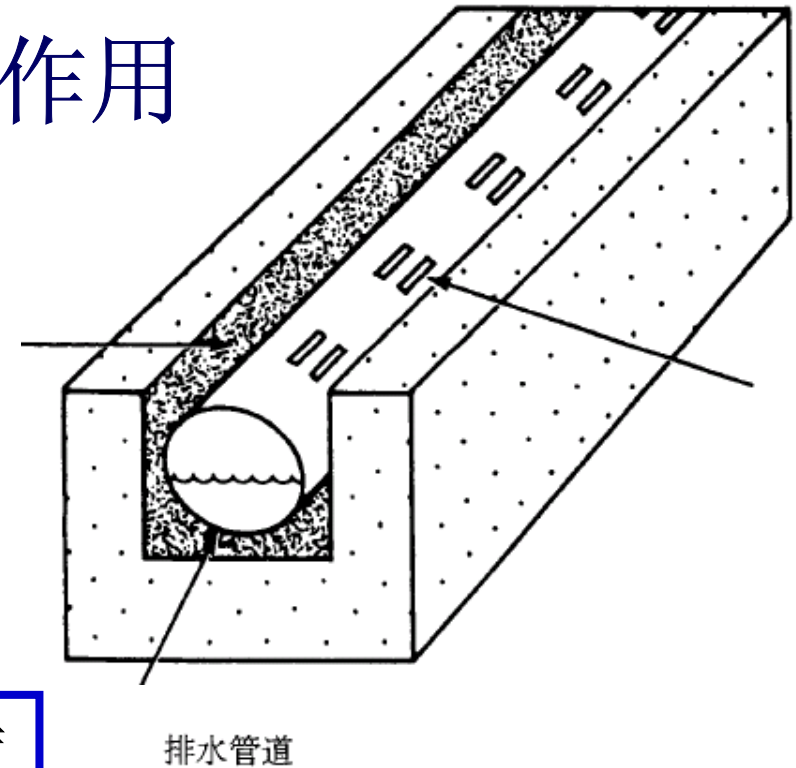
4. 模块及其作用

**排水沟边界(DRN)模块

排水流量 $q=C(H_{\text{cell}}-z_0)$, $H_{\text{cell}} > z_0$

排水流量 $q=0$, $H_{\text{cell}} \leq z_0$

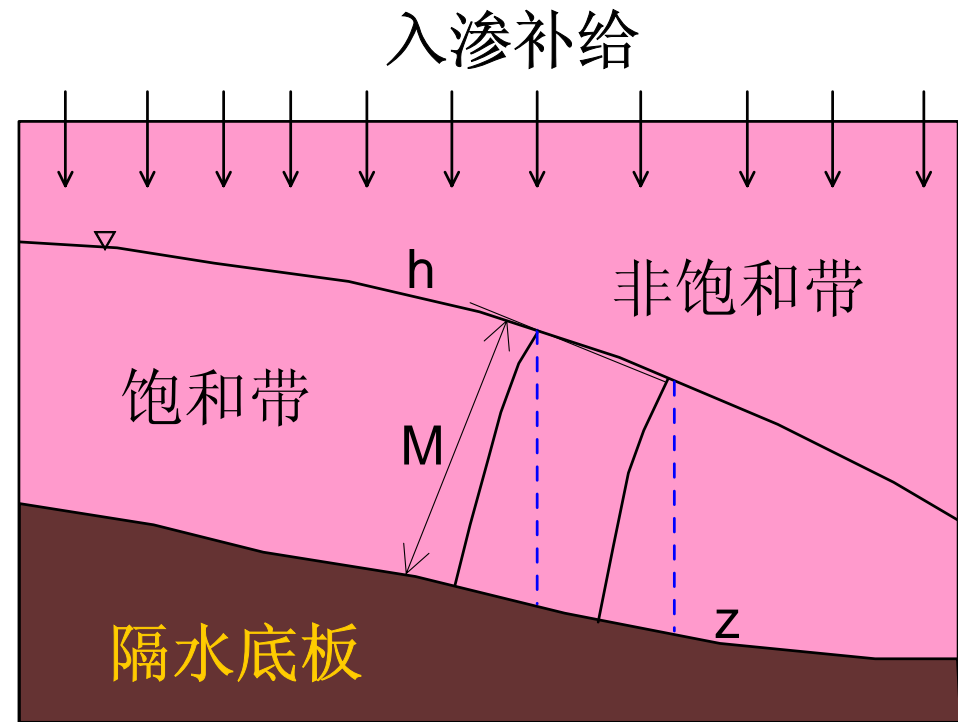
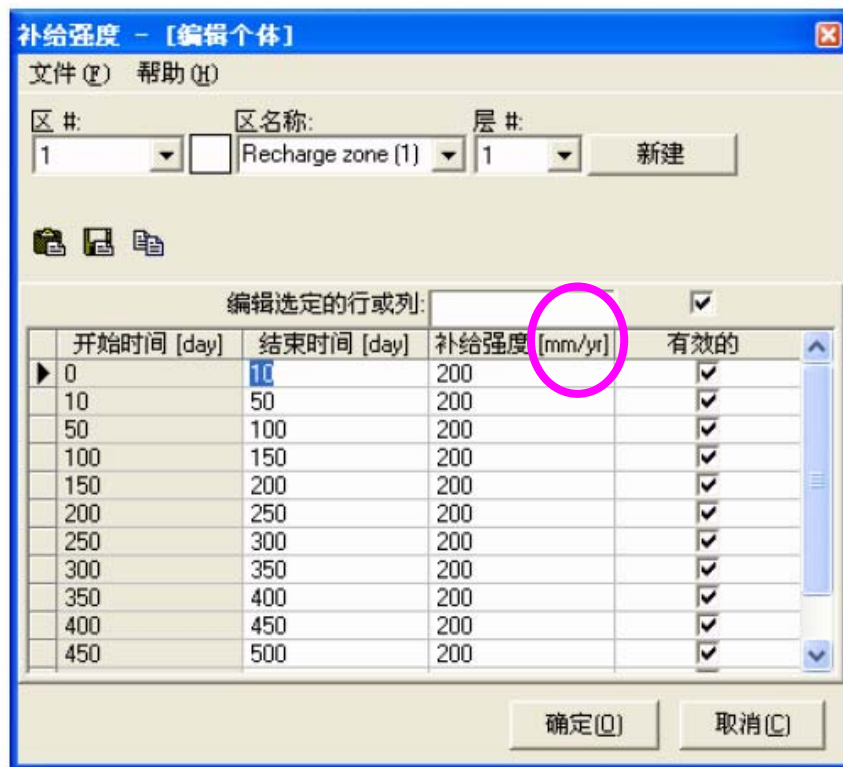
控制高度



4. 模块及其作用

**补给(RCH)模块

降水入渗、灌溉入渗等，可随时间变化



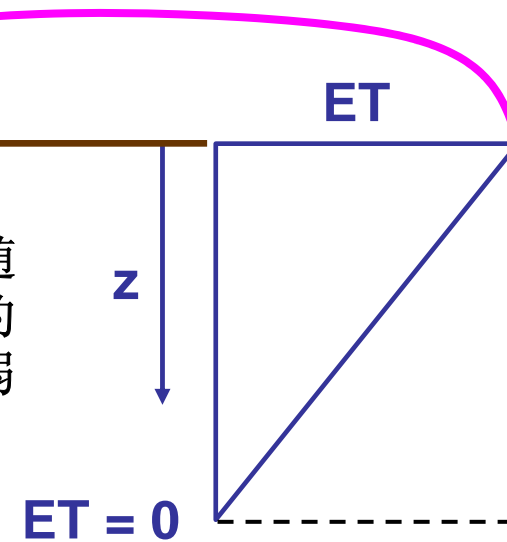
4. 模块及其作用

****蒸散(EVT)模块**

潜水蒸发

可暂且处理为
水面蒸发

蒸发强度随
潜水埋深的
加大而减弱



$$R_{ETi,j} = R_{ETMi,j}$$

$$R_{ETi,j} = 0$$

$$R_{ETi,j} = R_{ETMi,j} \left\{ \frac{h_{i,j,k} - (h_{st,j} - d_{i,j})}{d_{i,j}} \right\} \quad h_{st,j} - d_{i,j} \leq h_{i,j,k} \leq h_{st,j}$$

$$h_{i,j,k} > h_{st,j}$$

$$h_{i,j,k} < h_{st,j} - d_{i,j}$$

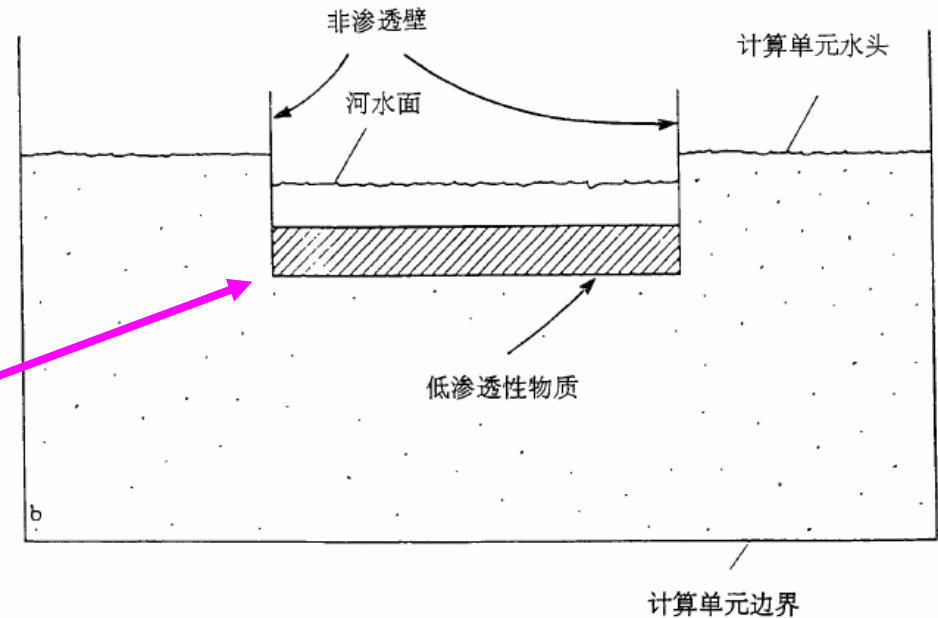
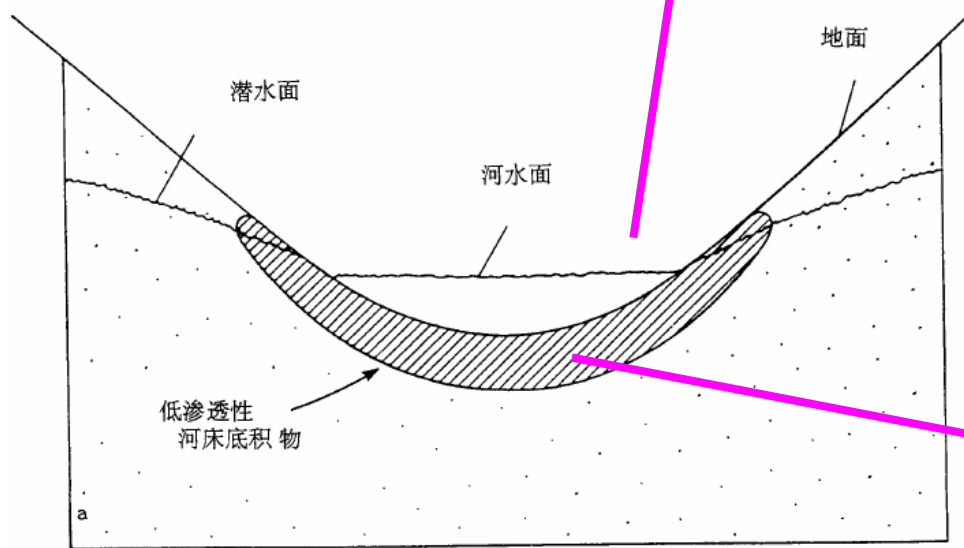
4. 模块及其作用

**河流边界(RIV)模块

通过河床与地表水交换

河流水位必须已知

简化处理



地下水排泄: $q = -C(H_{\text{cell}} - H_{\text{riv}})$

河流渗漏: $q = C(H_{\text{riv}} - H_{\text{cell}})$

导水系数 $C = \frac{\text{渗透系数} \times \text{宽度} \times \text{长度}}{\text{沉积物厚度}}$

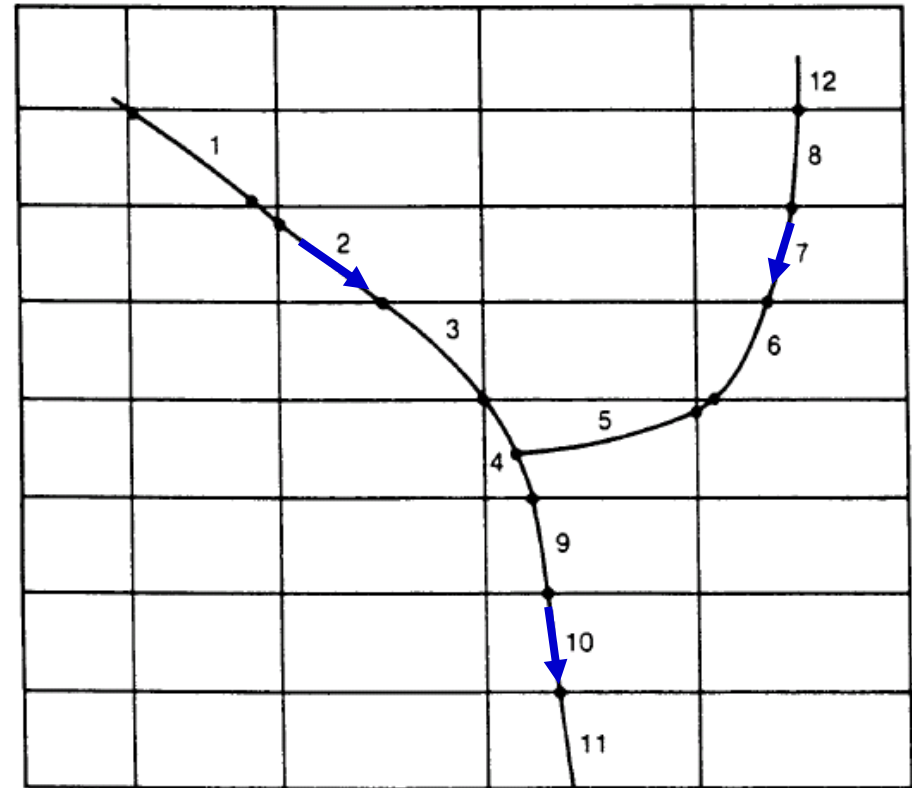
4. 模块及其作用

**河网(STR)模块

处理河流的支流汇集问题；
河流分成一定数量的河段；
河段通过节点相互连接。

河流的水位不是输入数据，
而是根据流量计算；
采用**Manning**(曼宁)公式。

模型处理相对繁琐。

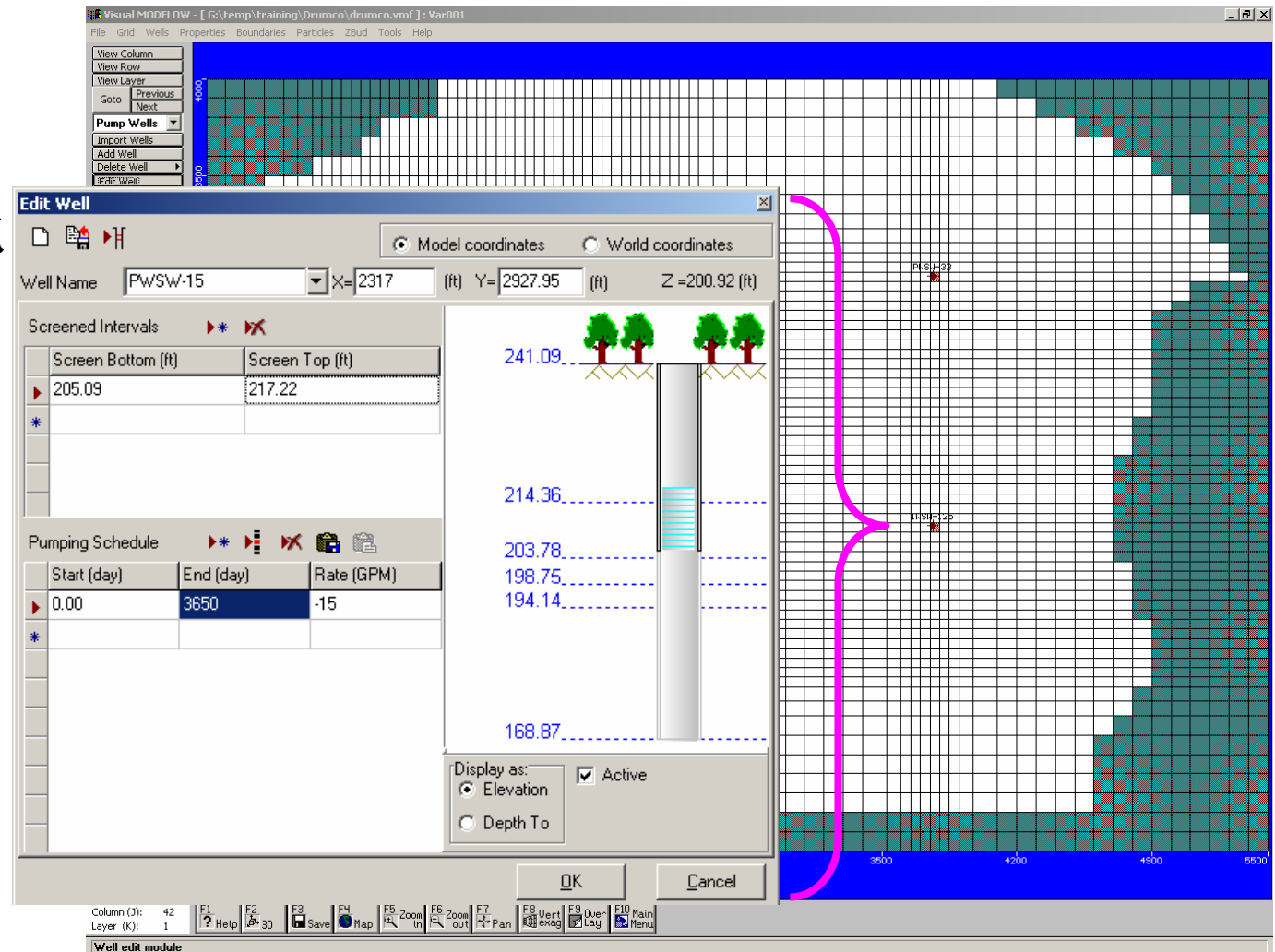
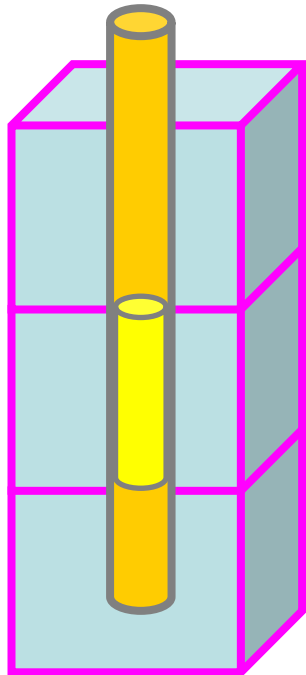


4. 模块及其作用

**水井(WEL)模块

井流量：抽水为负流量；注水为正流量

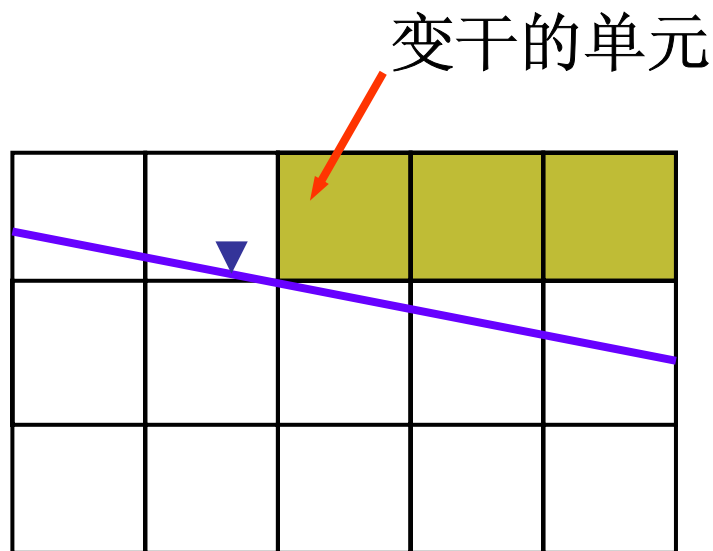
一个水井
只对应
一个模拟单元



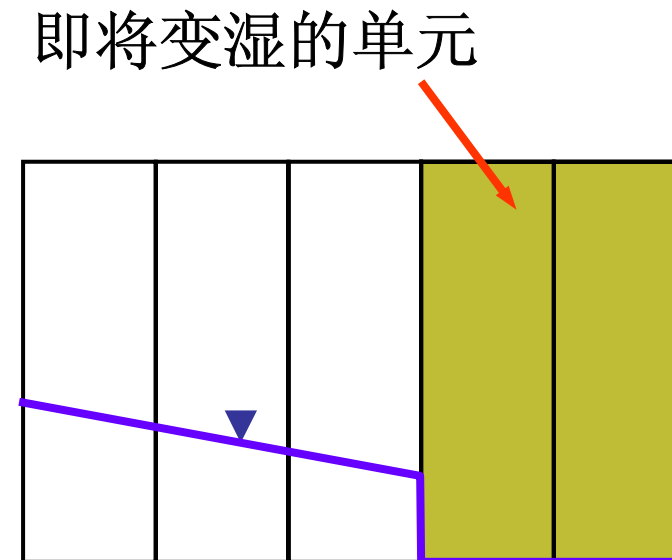
4. 模块及其作用

**干湿单元转化处理(Re-wetting)

一个湿单元如果水头低于单元的底部，变干；
一个干单元如果接受周围单元补给，可重新变湿。



干单元可以从下部的单元得到补给



干单元也可以从侧面的单元得到补给

5. VMODFLOW的应用

**水源地的评价

单井

$Q=4000 \text{ m}^3/\text{d}$

开采深度

50~60 m

其它参数

$K=10 \text{ m/d}$

$L=350\sim 450 \text{ m}$

