

## 第六节 蓄满产流模型





# 流域产流特征分析

产流特征从下面几个方面分析：

1. 根据流域所处的气候条件；
2. 根据其中典型山坡流域的包气带结构和水文动态；
3. 根据出口断面流量过程线形状、尤其是它的退水规律；
4. 根据流域中地下水动态观测；
5. 根据影响次降雨 - 径流关系的因素。

**基本产流模式**

蓄满产流

超渗产流

# 蓄满产流定义

**基本假设：**任一地点上，土壤含水量达**蓄满**（即达**田间持水量**）前，降雨量全部补充土壤含水量，不产流；当土壤蓄满后，其后续降雨量全部产生径流。

蓄满产流机制比较接近或符合土壤缺水量不大的湿润地区。这些地区，一场较大的降雨常易使全流域土壤含水量蓄满。



# 水文学人物

**赵人俊**，[教授](#)。[浙江](#)金华人。1945年毕业于中央大学水利系。1951年加入中国共产党。历任华东水利学院及河海大学教授、水文系副主任，中国水利学会水文专业委员会第三届副主任委员，国务院学会委员会第二届学科评议组成员。对河道汇流和湿润地区产流规律有较深研究。七十年代研制出我国第一个大流域降雨径流计算模型——新安江模型，解决了大流域降雨径流计算中雨量分布不均匀的问题。著有《中国湿润地区供水预报方法》、《流域水文模拟——新安江模型与陕北模型》。

他潜心钻研业务，学术水平跻身国际先进行列，享有“新安江先生”、“[新安江模型之父](#)”的称誉。赵人俊先生1993年在南京病逝，享年69岁。



**纪念赵人俊教授九十周年诞辰暨新安江模型研讨座谈会**



# 水文学人物

**Liang, Xu**, University of Pittsburgh

<http://www.engineering.pitt.edu/XuLiang/>



Variable Infiltration Capacity (VIC) Macroscale Hydrologic  
Model

<http://www.hydro.washington.edu/Lettenmaier/Models/VIC/Overview/ModelOverview.shtml>

# 蓄满产流现象的发现

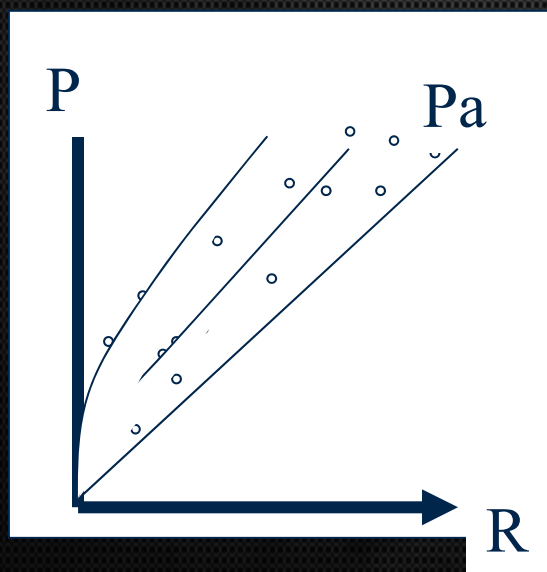
60年代初

水文资料积累  
洪水预报需要

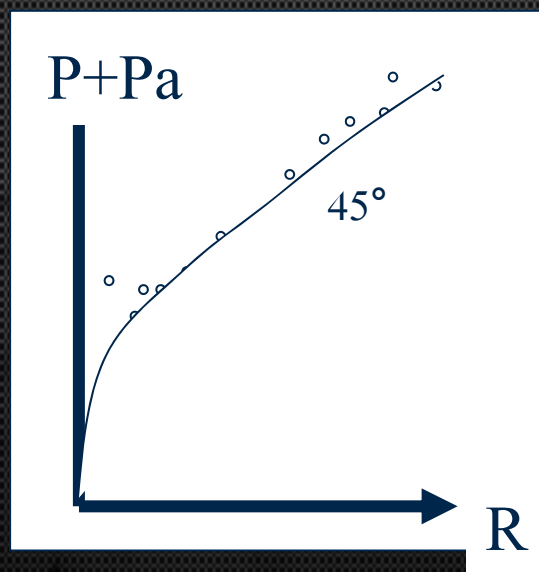
大量开展降雨  
径流关系分析

改进计算  
方法 (Pa)

$P \sim P_a \sim R$



$P + P_a \sim R$



$R =$   
 $P$   
 $\downarrow$   
蓄满



# (一)蓄满产流关系

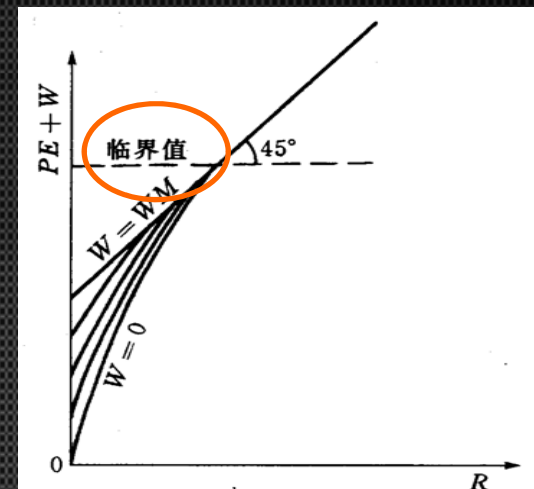
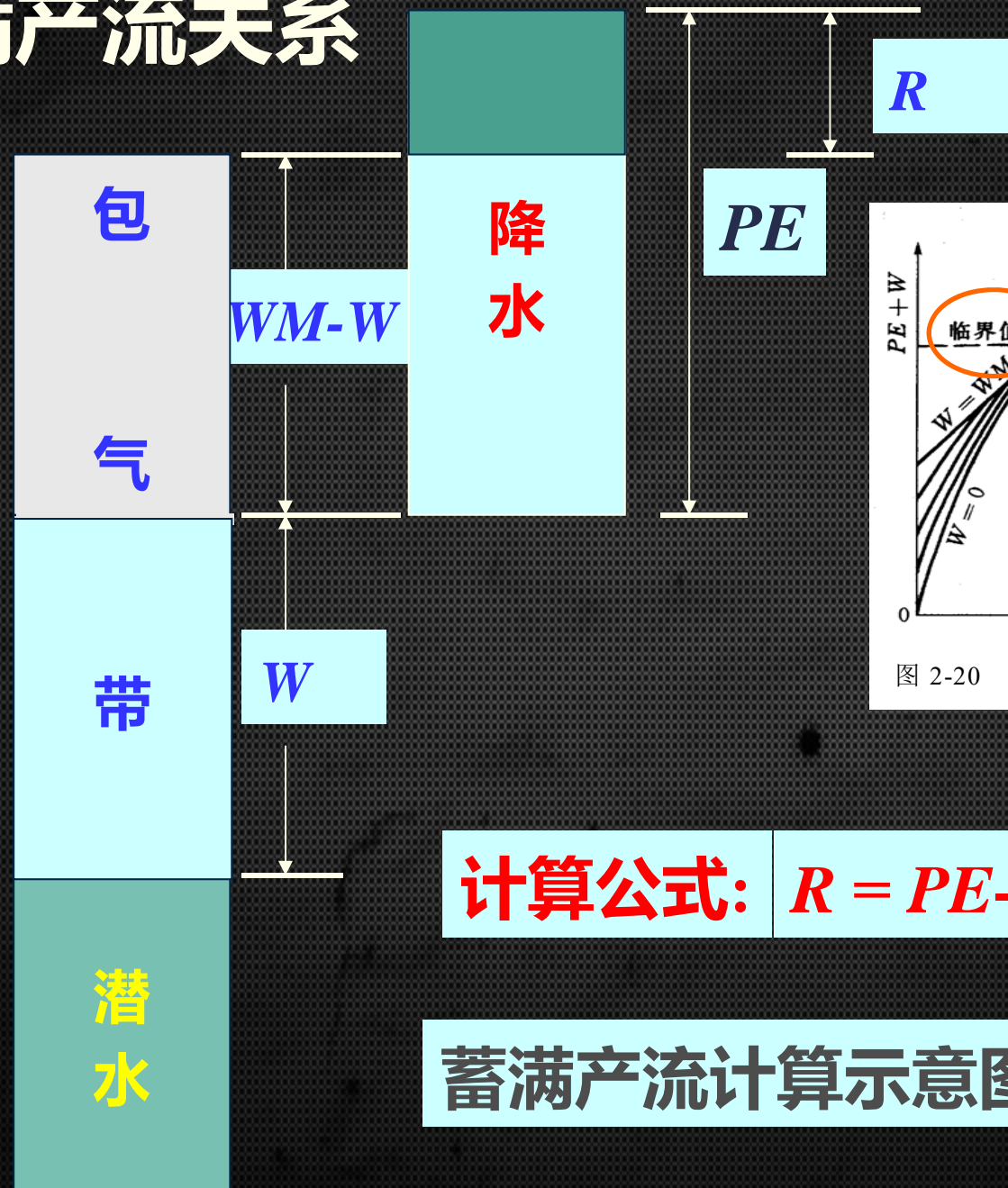


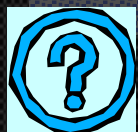
图 2-20  $PE+W$  与  $R$  关系示意图

计算公式:  $R = PE - (WM - W)$

蓄满产流计算示意图



## (二) 蓄水容量曲线



若一场降雨不能使全流域蓄满，流域内也观测到径流，why?

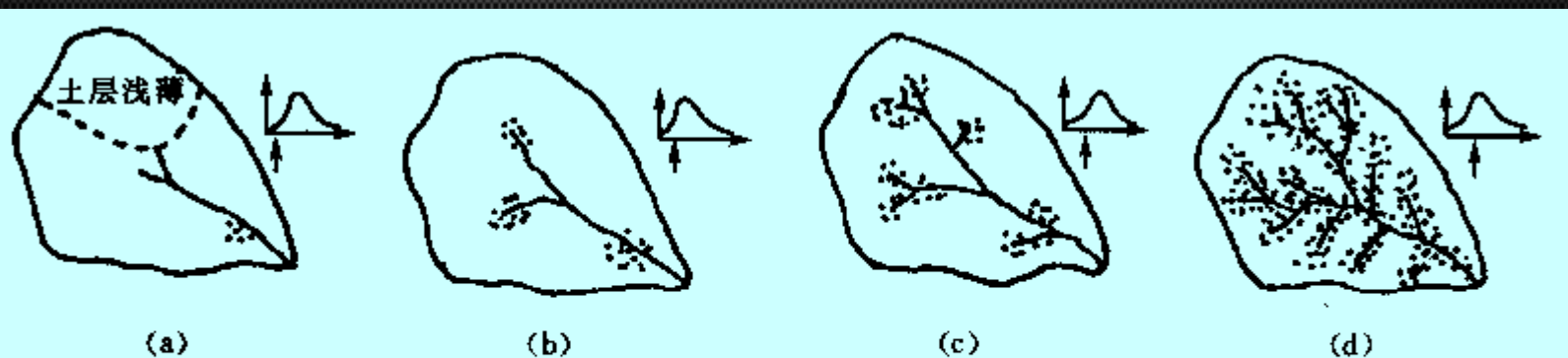


图 12-15 流域产流面积变化

(a) 降雨开始前；(b) 降雨初期；(c)、(d) 继续降雨

降雨开始前，河流中的水量主要来自流域中包气带较厚的中下游地区的地下水补给。

降雨开始后，主要来自土层浅薄地区（上游）、河沟附近土壤含水量较大的地区、或雨强大的地区。

# 蓄满产流面积变化的特点

- 随着降雨量的不断增加，产流面积不断增大；
- 产流面积的变化与降雨强度无关；
- 全流域发生蓄满产流的条件是总的降雨与蒸发的差值大于等于 $W_{mm}$



## (二) 蓄水容量曲线



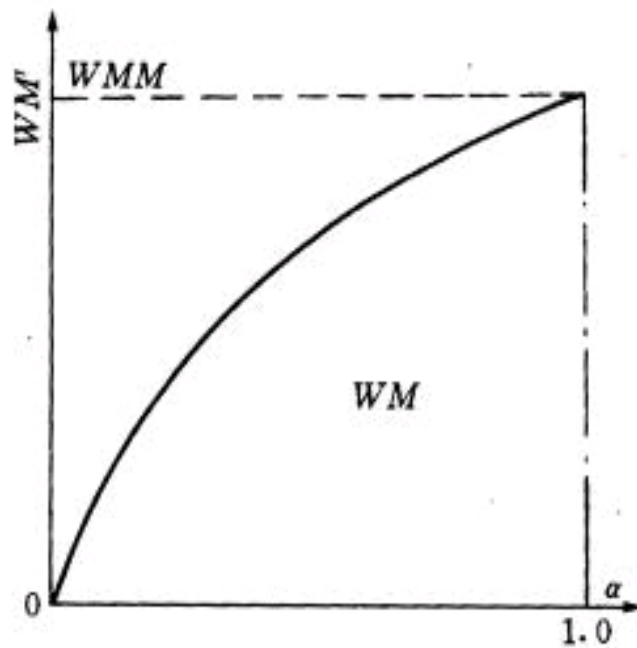
若一场降雨不能使全流域蓄满，流域内也观测到径流，why?

原因：流域内各点包气带厚度不一致，各点蓄水容量（土壤缺水量）也不相同，先蓄满的地方先产流，后蓄满的地方后产流，产流面积是不断变化的，这种产流状态称之部分产流（局部产流），最后逐步过渡到全面产流



**流域蓄水容量曲线** - - 表征土壤缺水量空间分布的不均匀性

## 蓄水容量曲线



## 流域蓄水容量曲线

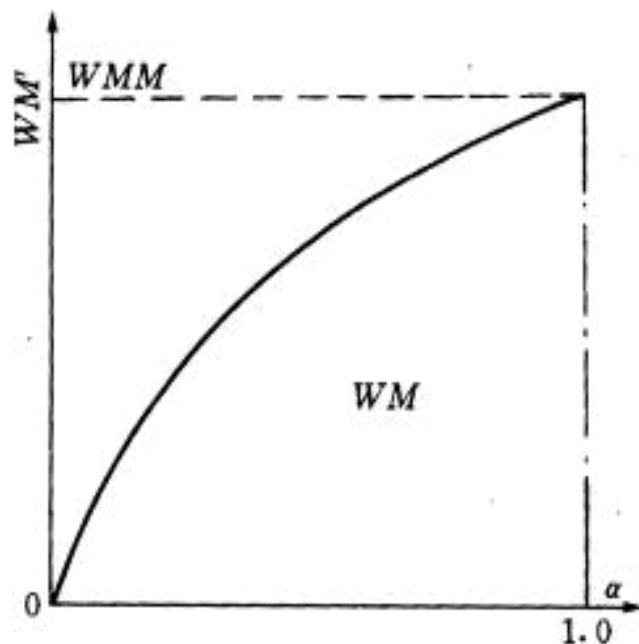
流域内各点包气带的蓄水容量是不同的。

➤将各点包气带蓄水容量从小到大排列；

➤以包气带达到田间持水量时的土壤含水量 $WM$ 为纵坐标，以流域内小于等于该 $WM$ 的面积占全流域的面积比 $\alpha$ 为横坐标；

所绘的曲线称为流域蓄水容量曲线。

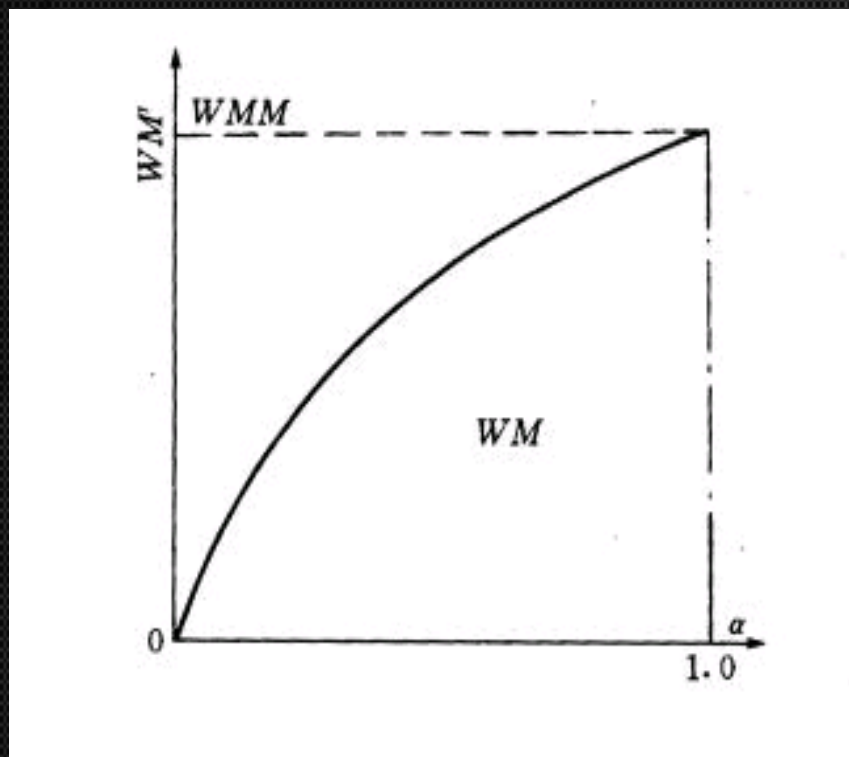




**流域蓄水容量曲线**

基本性质:

1. 单增曲线
2. 纵横坐标表示流域中小于等于  $W'_m$  值的流域面积所占比重;
3. 曲线所包围面积等于流域蓄水容量或最大持水量
4. 对于一个流域来说, 曲线是唯一的
5. 曲线不能具体表示流域上具体地点包气带的情况



流域蓄水容量曲线

假设流域蓄水容量曲线服从：

$$\alpha = 1 - \left(1 - \frac{WM'}{WMM}\right)^b$$

那么：

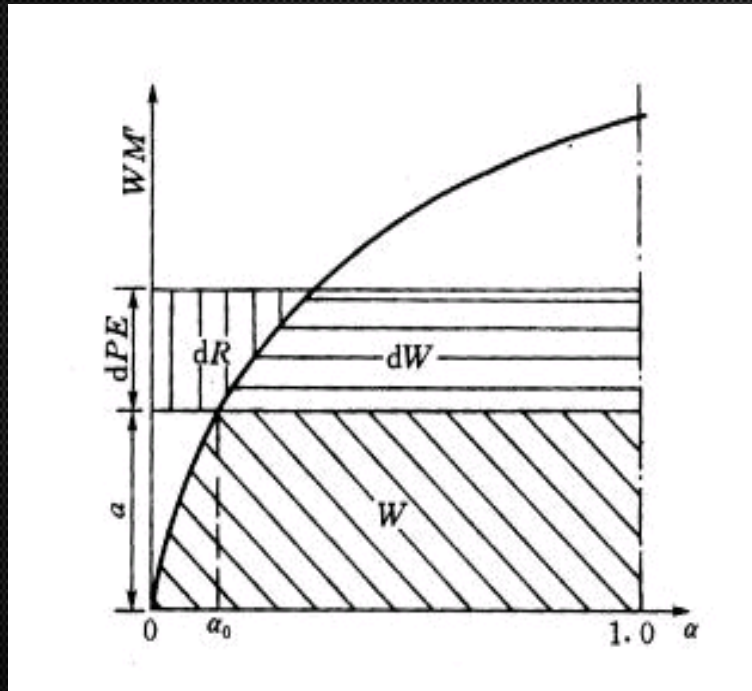
$$WM = \int_0^{WMM} (1 - \alpha) dWM'$$

$$WM = \frac{WMM}{1+b}$$



### (三) 降雨量产流量计算(预报)

#### 1、初始土湿分布与计算



$$W = \int_0^a (1 - \alpha) dW M'$$

$$W = WMM \left[ 1 - \left( 1 - \frac{a}{WMM} \right)^{b+1} \right]$$

$$a = WMM \left[ 1 - \left( 1 - \frac{W}{WMM} \right)^{\frac{1}{1+b}} \right]$$

## 2、建立降雨径流关系

$$a + PE \leq WMM$$

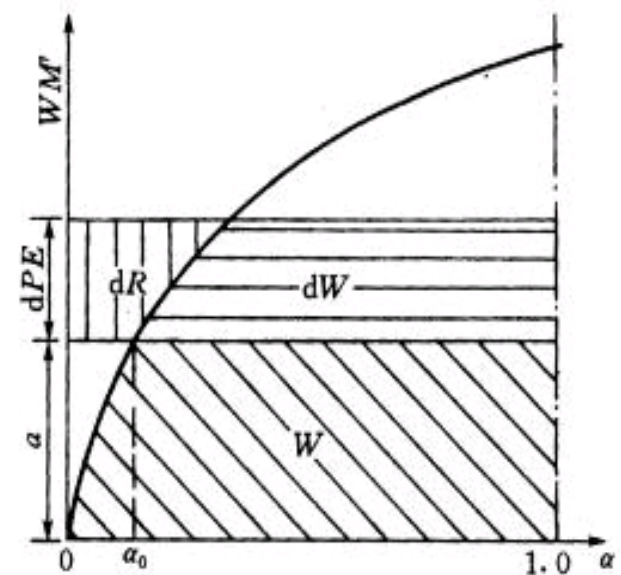
$$R = \int_a^{a+PE} \alpha dWM'$$

$$R = PE - WM \left( 1 - \frac{a}{WMM} \right)^{b+1} + WM \left( 1 - \frac{PE+a}{WMM} \right)^{b+1}$$

$$R = PE + W - WM + WM \left( 1 - \frac{PE+a}{WMM} \right)^{b+1}$$

$$a + PE \geq WMM$$

$$R = PE + W - WM$$





# 流域蓄水容量曲线与降雨径流相关图

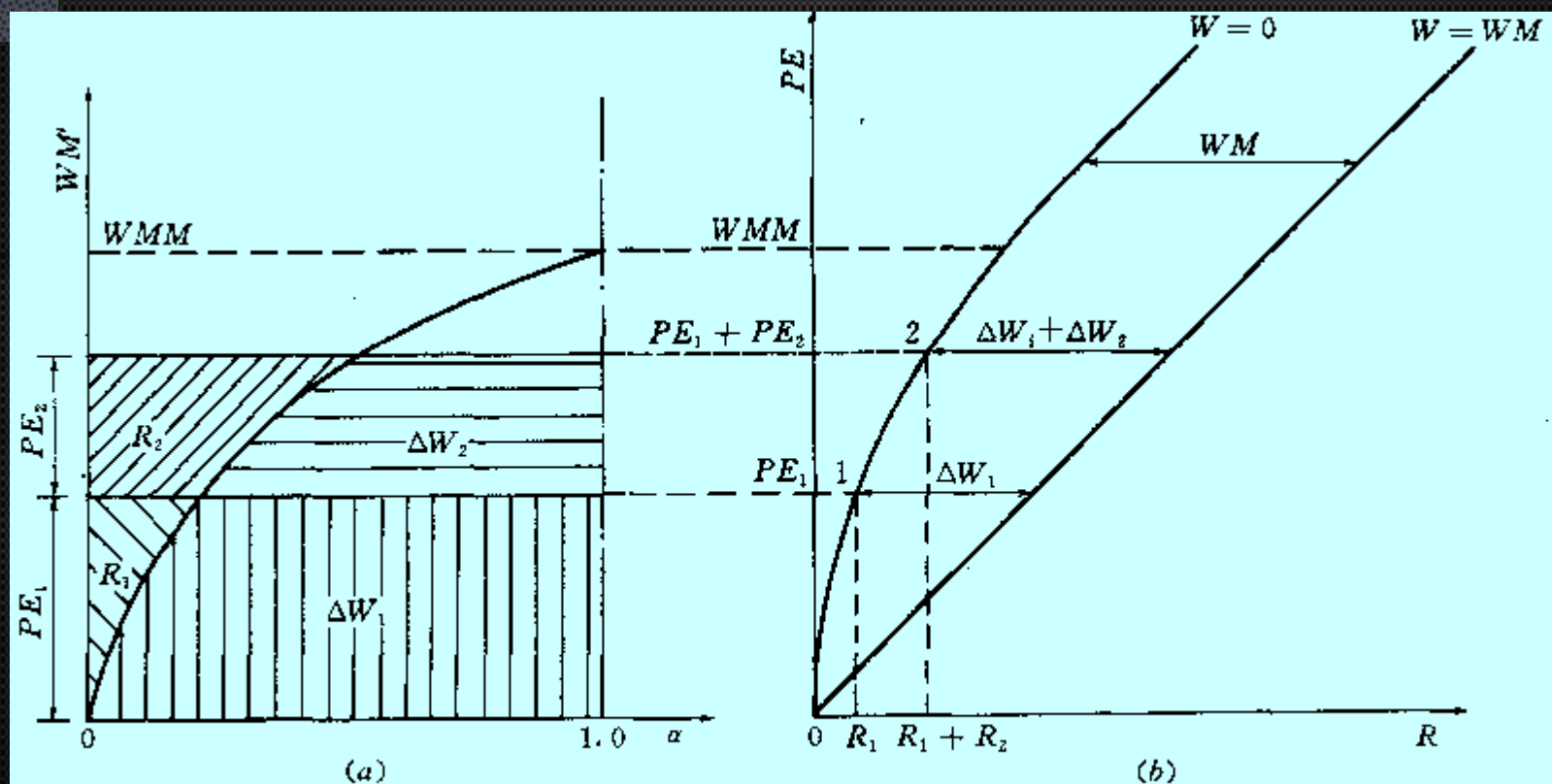
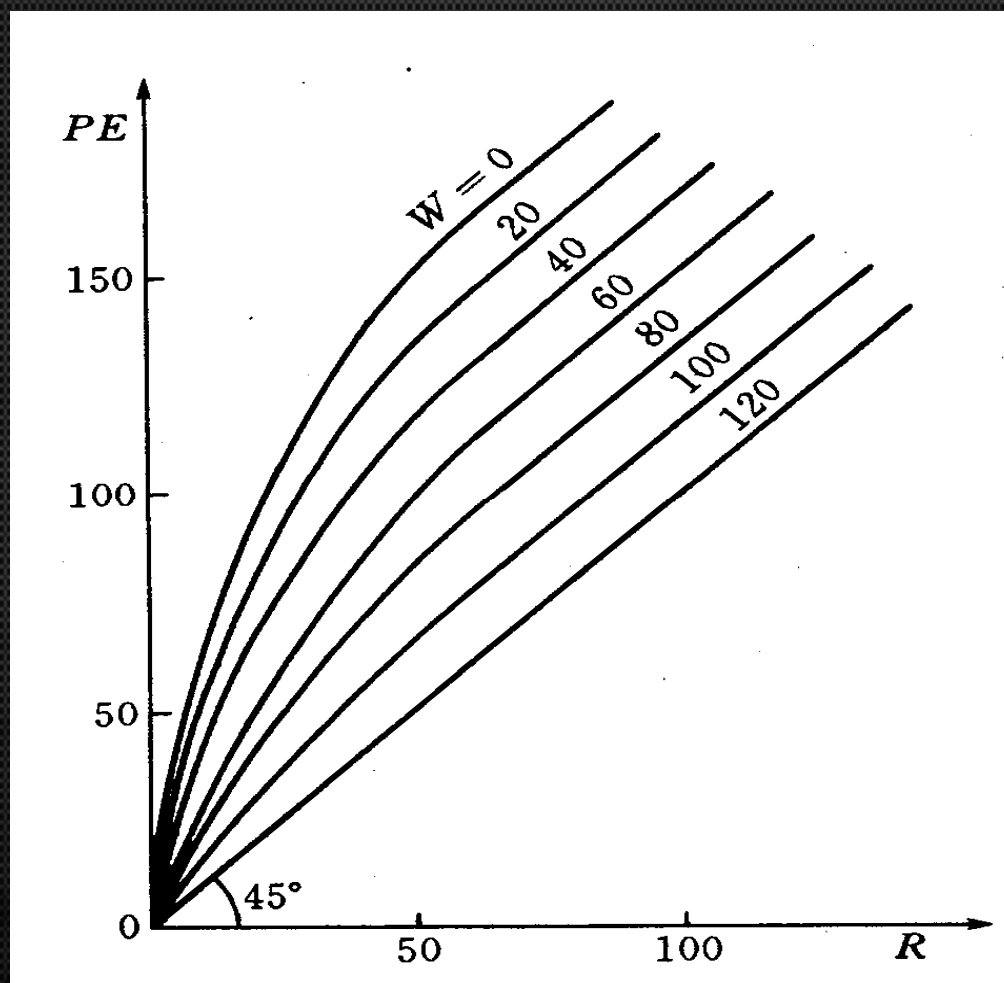


图 3-23 蓄水容量曲线转换为降雨径流关系示意图

流域蓄水容量曲线是降雨径流相关图的理论表达形式

# PE ~ W ~ R关系图





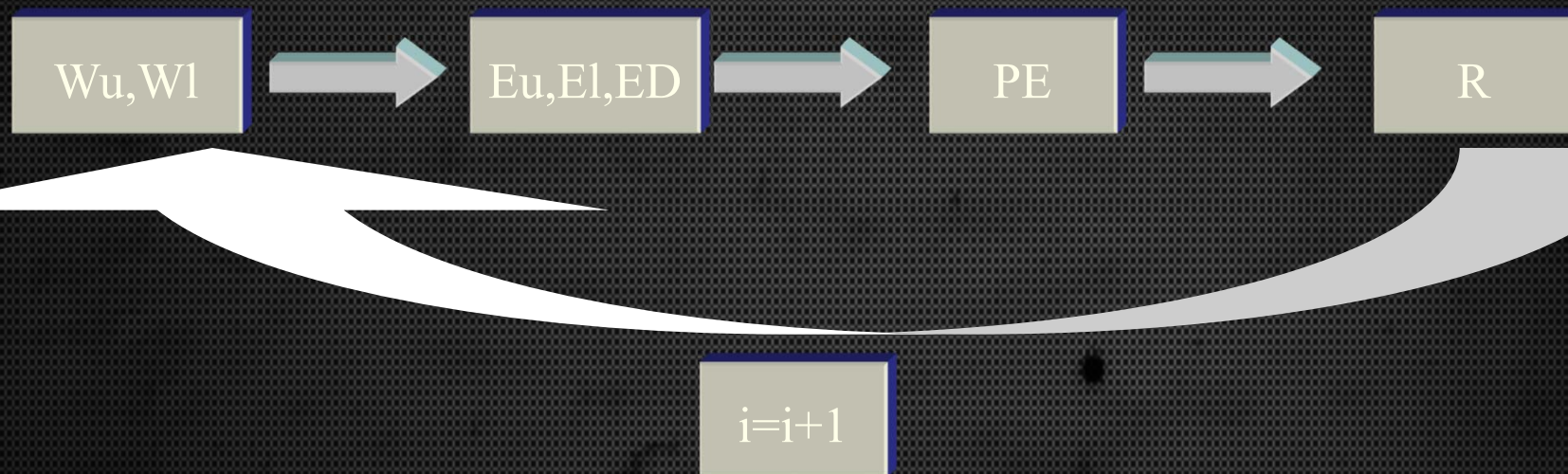
### 3、产流量计算(预报)

1)根据前期实测降雨量和蒸散发计算模式，推算本次降雨初始时的流域土湿 $W$

2)计算本次降雨的流域平均值 $P$ ，扣除雨期蒸发后得 $PE$ 值

3)查降雨径流相关图或者根据公式计算 $R$

# 蓄满产流计算流程





## 二、水源划分

### (一) 二水源划分（直接径流 + 地下径流）

Notes:

- 1) 超渗产流只有地面径流，水源划分主要针对蓄满产流；
- 2) 蓄满后才能产流，此时下渗按FC ( $f_c$ ) 下渗。

## 二、 水源划分

稳渗率 $f_c$ 划分产流量中的直接径流和地下径流。

Darcy的土壤水流运动定律，垂向水流运动：

$$q = k \cdot \frac{d\psi}{dZ} + k$$

$q$  – 水流通量；

$\psi$  – 毛管势；

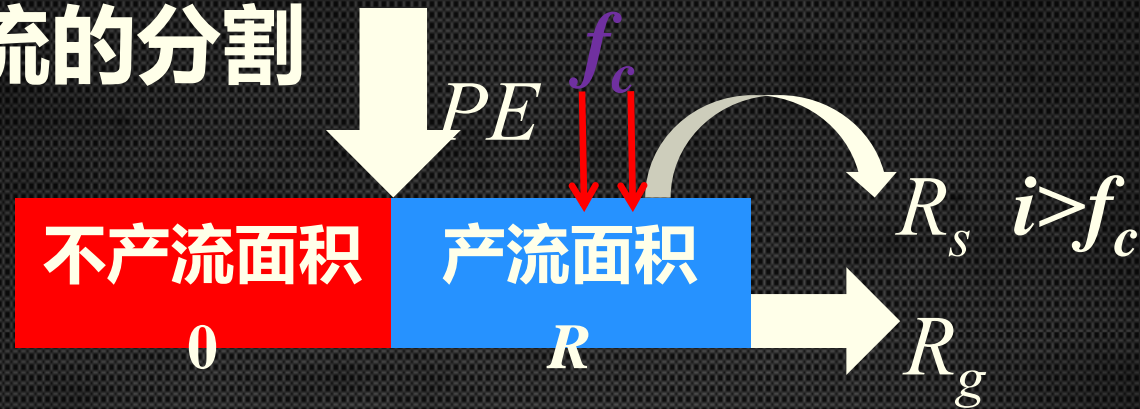
$k$  – 水力传导度。



## 二、水源划分

当土壤含水量达饱和时，毛管势梯度值很小可以忽略，水流垂向运动通量主要取决于水力传导度，其值稳定于一个常数值，即稳定下渗率 $f_c$

# 蓄满产流径流的分割



蓄满产流是在包气带蓄满后才产流，此时的下渗率为稳定下渗率 $f_c$ 。当雨强 $i > f_c$ 时， $(i - f_c)$ 形成地面径流， $f_c$ 形成地下径流。

对于一场降雨，产生的地下径流总量为：

$$\sum RG_{\Delta t} = \sum_{P_{\Delta t} - E_{\Delta t} \geq f_c \Delta t} \frac{R_{\Delta t}}{P_{\Delta t} - E_{\Delta t}} f_c \Delta t + \sum_{P_{\Delta t} - E_{\Delta t} < f_c \Delta t} R_{\Delta t}$$

超渗雨时段

非超渗雨时段



## 二、水源划分：按稳定下渗率进行分割

全流域蓄满前：

$$PE < FC,$$

➤ 产流面积上( $\alpha_1$ ), 所有降雨全部用于产流 (地下径流)

直接径流:  $r_{s1}=0$

地下径流:  $r_{g1}=r_1=PE \cdot r_1 / PE = PE \cdot \alpha_1$

➤ 其他面积上( $1 - \alpha_1$ ), 降雨补充土壤含水量

$$\Delta W = PE(1 - \alpha_1)$$

## 二、水源划分：按稳定下渗率进行分割

全流域蓄满前：

$PE > FC$ ,

➤ 产流面积上( $\alpha_2$ ), 降雨产流

$$r_g = FC \cdot \alpha_2,$$

$$r_s = (PE - FC) \cdot \alpha_2$$

➤ 其他面积上( $1 - \alpha_2$ ), 降雨补充土壤含水量。

$$\Delta W = PE(1 - \alpha_2)$$



## 二、水源划分：按稳定下渗率进行分割

全流域蓄满后：

$$r_g = FC$$

$$r_s = PE - FC$$

## 二、水源划分

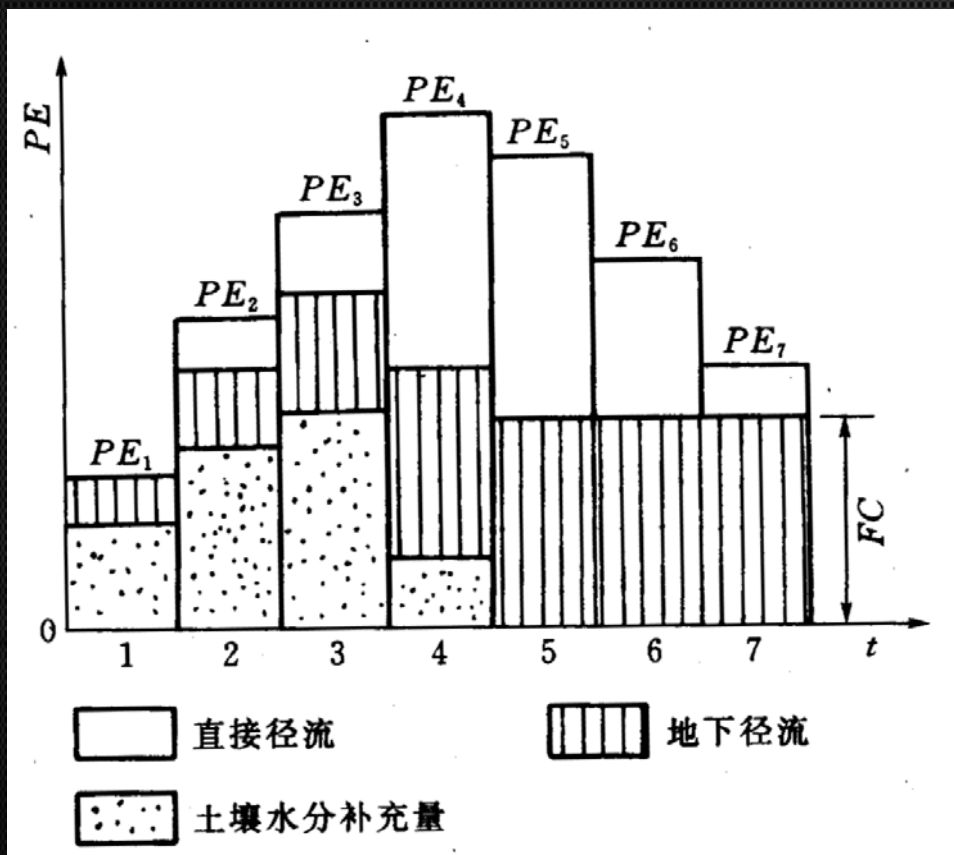


图 2-25 水源划分过程示意图

$$RG = \sum_{i, PE_i > FC} FC \cdot \frac{r_i}{PE_i} + \sum_{i, PE_i \leq FC} r_i$$

$$RS = \sum_{i, PE_i > FC} (PE_i - FC) \frac{r_i}{PE_i}$$



## $f_c$ 的分析推求

稳定入渗率 $f_c$ 可用实测降雨径流资料采用**试错法**得到。根据实测降雨过程、净雨过程、地下径流总量，假设一个 $f_c$ 代入公式计算，当计算得地下径流总量值与实际值相等时即为所求 $f_c$ 。分析多次洪水，定出流域 $f_c$ 的平均值。

## $f_c$ 推求举例

试根据流域一次洪水资料分析确定 $f_c$ ，该次洪水之 $R = 71.8\text{mm}$ ， $R_g = 28.0\text{mm}$ ，相应的降雨、蒸散发过程及产流计算所得的时段总径流量、时段末的产流面积列于下表，计算时段取为6h。



# $f_c$ 推求举例

时间	P-E(mm)	R(mm)	$A=R/(P-E)$
1965.4.16 8:00			
14:00	4.2	2.0	0.48
20:00	14.6	10.5	0.72
17日 2:00	31.6	29.1	0.92
8:00	25.9	25.9	1.0
14:00	3.2	3.2	1.0
20:00	0.5	0.5	1.0
18日 2:00	0.6	0.6	1.0

## $f_c$ 推求举例

设 $f_c = 1.0\text{mm/h}$ ，则根据下面的公式，可以计算

$$RG = \sum_{\substack{i \\ PE_i > FC}} FC \cdot \frac{r_i}{PE_i} + \sum_{\substack{i \\ PE_i \leq FC}} r_i$$

$$RG = 1 * (0.72 + 0.92 + 1) * 6 + (2 + 3.2 + 0.5 + 0.6) = 22.1\text{mm}$$

再假设 $f_c = 1.4\text{mm/h}$

$$RG = 1.4 * (0.72 + 0.92 + 1) * 6 + (2 + 3.2 + 0.5 + 0.6) = 28.4\text{mm}$$

接近 $R_g = 28\text{mm}$ ，故取 $f_c = 1.4\text{mm/h}$



## $f_c$ 的应用

【例】 已知某流域降雨径流相关图和稳定入渗率 $f_c = 1.5\text{mm/h}$ ,一次实测暴雨过程如表(1) (2) 栏。请根据 $f_c$ 将径流划分为地表径流 $R_s$ 和地下径流 $R_g$ 。

月·日·时	PE	R(mm)	F <sub>r</sub>	FC(mm)	R <sub>g</sub> (mm)	R <sub>s</sub> (mm)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	
8·1·0						
.....6	1.4	0.4	0.286	9.0	0.4	0
.....12	4.3	1.5	0.349	9.0	1.5	0
.....18	9.7	3.4	0.351	9.0	3.2	0.2
8·2·0	2.3	0.9	0.391	9.0	0.9	0
.....6	3.6	1.5	0.417	9.0	1.5	0
.....12	5.4	2.4	0.444	9.0	2.4	0
.....18	28.1	16	0.569	9.0	5.1	10.9
8·3·0	30.1	30.1	1.000	9.0	9.0	21.1
.....6	10.5	10.5	1.000	9.0	9	1.5
.....12	15.3	15.3	1.000	9.0	9	6.3
.....18	5	5	1.000	9.0	5.0	0
合计	115.7	87.0			47.0	40.0



## (二) 三水源划分(RS,RI,RG)

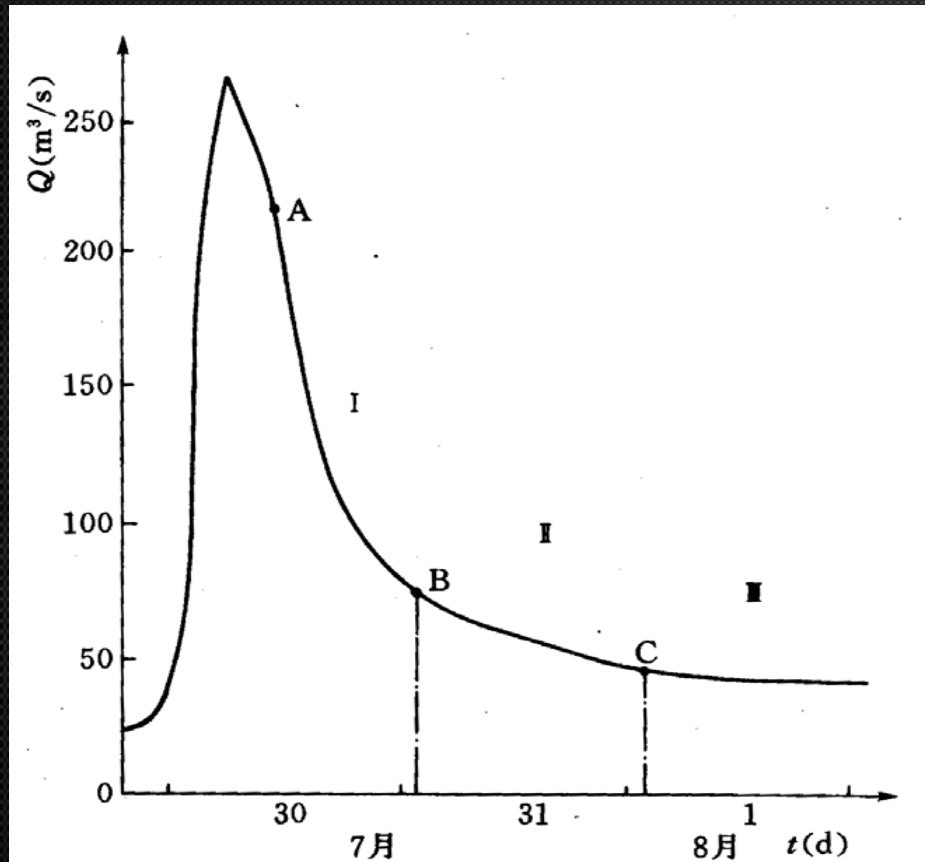


图 2-26 孙水关流域一次洪水过程

退水过程，明显3段：

**A-B: RS退水**

**B-C: RI退水**

**C以下: RG退水**

# 径流形成:

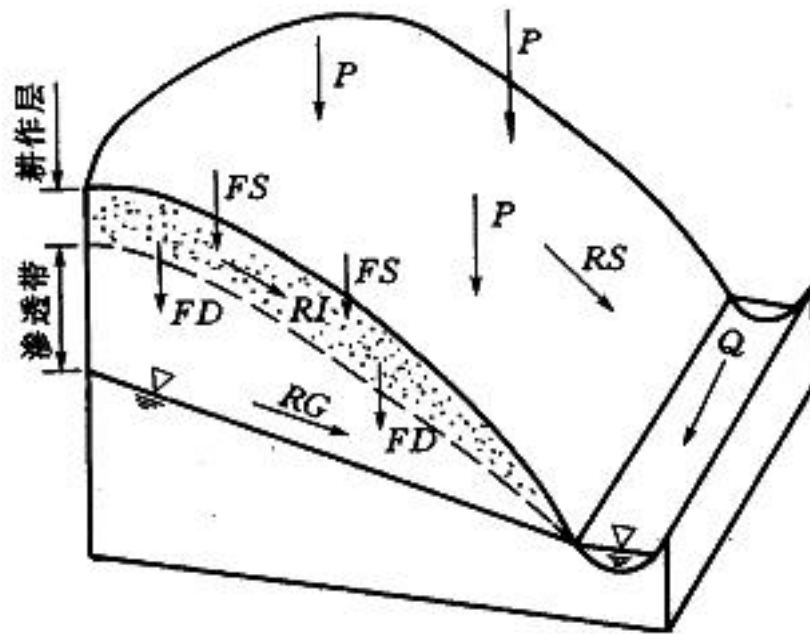
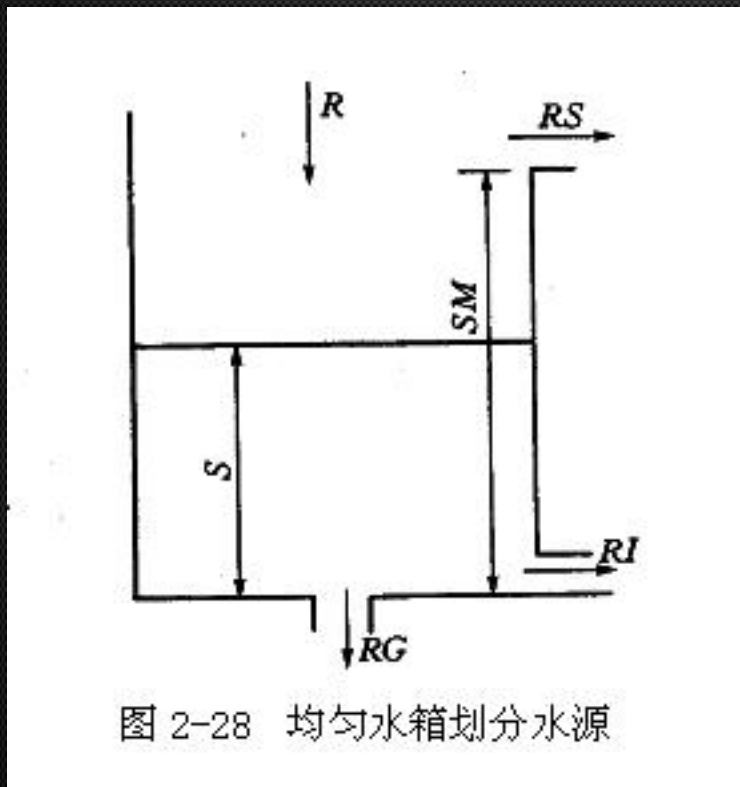


图 2-27 土壤剖面结构概化图

**$FS > FD$ :**  
**自由水聚积**  
**横向流动 - RI**



# 水箱概念模型:



$R+S>SM$ :

$$RS = R + S - SM$$

$$RI = KI \cdot SM$$

$$RG = KG \cdot SM$$

$R+S \leq SM$ :

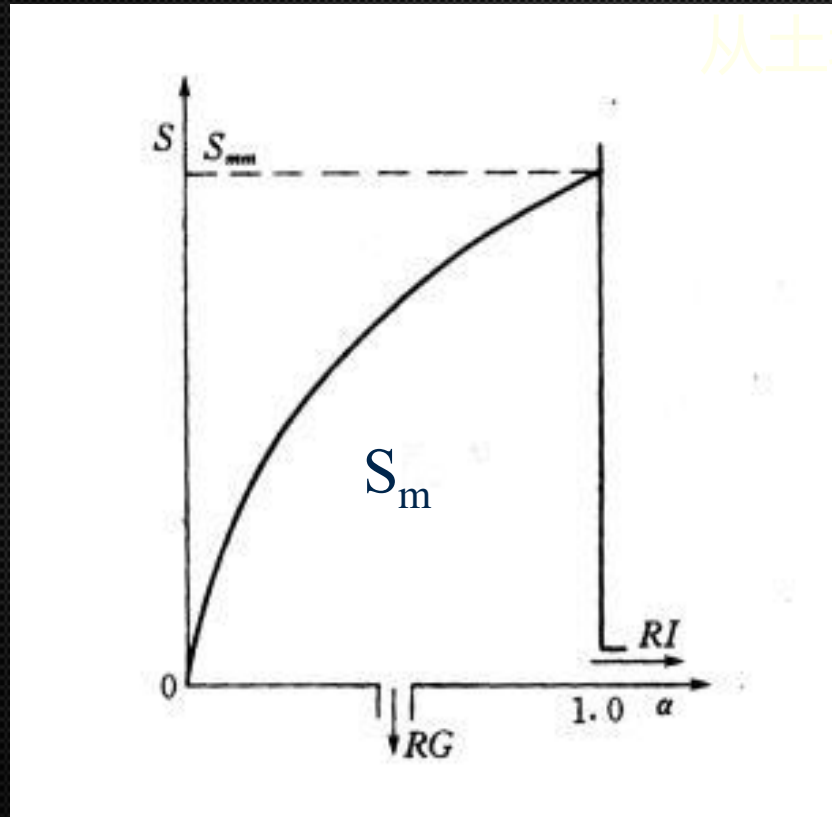
$$R S = 0$$

$$RI = KI \cdot (R + S)$$

$$RG = KG \cdot (R + S)$$

# 自由水蓄量分布

自由水：土壤中可以自由移动的、与各土壤粒子没有相互作用的水分。包括毛管水和重力水。毛管水因毛管吸力而被保持在土壤中，重力水则在降雨后迅速从土壤上层流到下层。

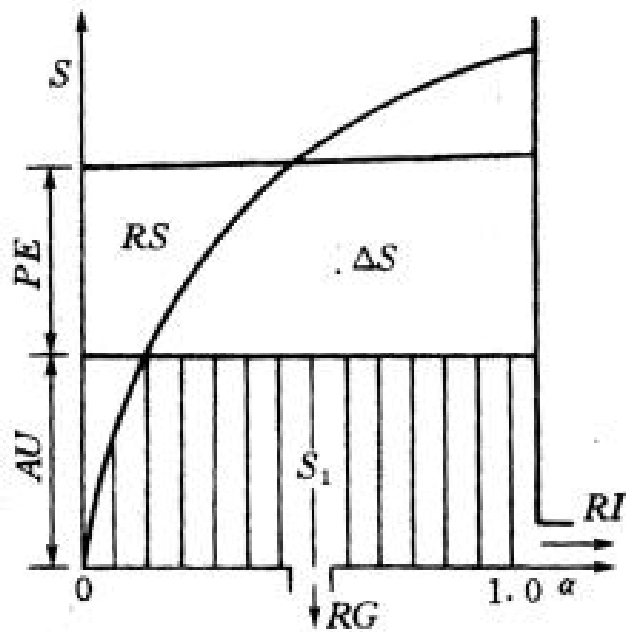


$$\alpha = 1 - \left(1 - \frac{S}{S_{mm}}\right)^{EX}$$

$$S_m = \frac{S_{mm}}{1 + EX}$$



# 水箱模型划分水源



$$S_1 = \int_0^{AU} (1 - \alpha) ds = S_m - S_m \left(1 - \frac{AU}{S_{mm}}\right)^{1+EX}$$

$$AU = S_{mm} \left[1 - \left(1 - \frac{S_1}{S_m}\right)^{\frac{1}{1+EX}}\right]$$

# 水箱模型划分水源(第二版)

$PE+AU < S_{mm}$ :

$$RS = FR[PE + S_1 - S_m + S_m(1 - \frac{PE + AU}{S_{mm}})^{EX+1}]$$

$PE+AU \geq S_{mm}$ :

$$RS = FR(PE + S_1 - S_m)$$

本时段末的自由水蓄量为:

$$S_2 = S_1 + PE - RS$$

相应的壤中流和地下径流为:

$$RI = KI \cdot S \cdot FR$$

$$RG = KG \cdot S \cdot FR$$

$$FR = 1.0 - (1.0 - \frac{W}{WM})^{\frac{b}{1.0 + b}}$$



# 水箱模型划分水源(第三、四版)

$PE+AU < S_{mm}$ :

$$RS = FR \left[ PE + S_1 \frac{FR_1}{FR} - S_m + S_m \left( 1 - \frac{PE + AU}{S_{mm}} \right)^{EX+1} \right]$$

$PE+AU \geq S_{mm}$ :

$$RS = FR \left( PE + S_1 \frac{FR_1}{FR} - S_m \right)$$

本时段末的自由水蓄量为:

$$S = S_1 \frac{FR_1}{FR} + \frac{R - RS}{FR}$$

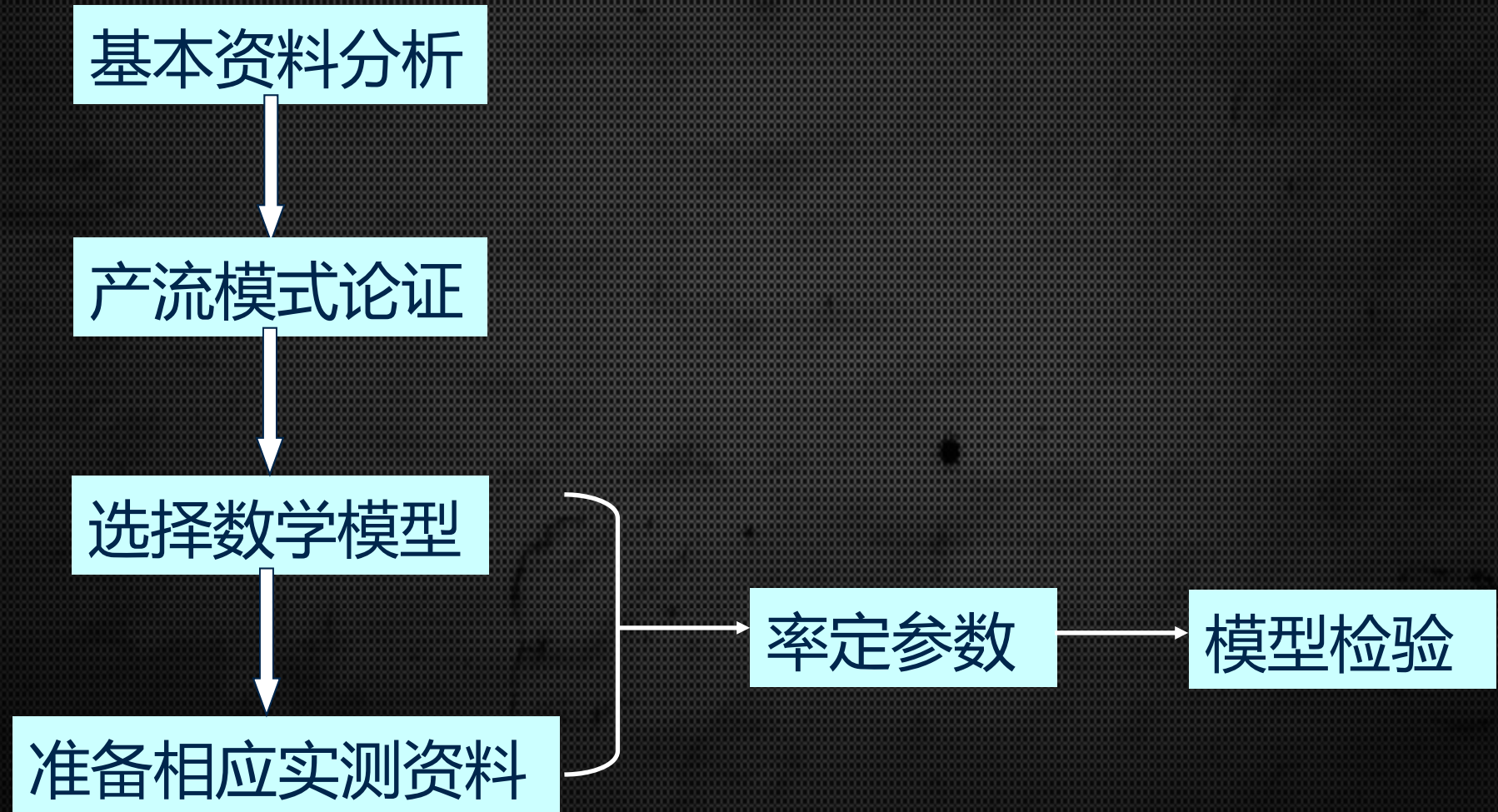
相应的壤中流和地下径流为:

$$RI = KI \cdot S \cdot FR$$

$$RG = KG \cdot S \cdot FR$$

$$AU = S_{mm} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{S_1 \frac{FR_1}{FR}}{S_m} \right)^{\frac{1}{1+EX}} \right]$$

### 三、产流量预报模型建立





# **(一) 资料准备**

**水文、气象资料：**

**日平均流量：出口断面观测值**

**日蒸发量：蒸发皿观测值**

**日降雨量：流域平均降雨量**

**雨量站分布**

**雨量站密度**

**雨量站代表性**

**计算方法**

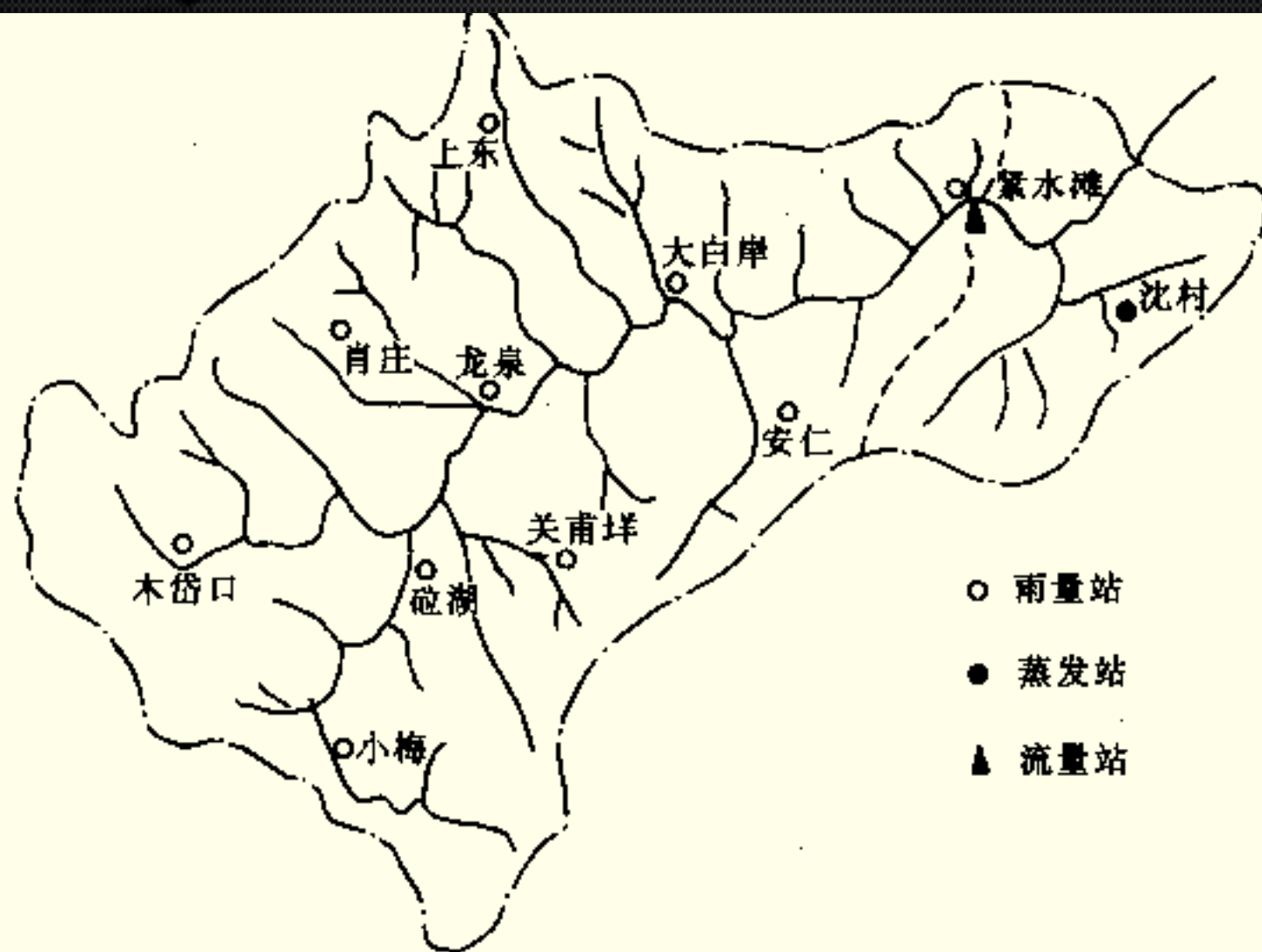


图 3-31 紧水滩流域站网分布

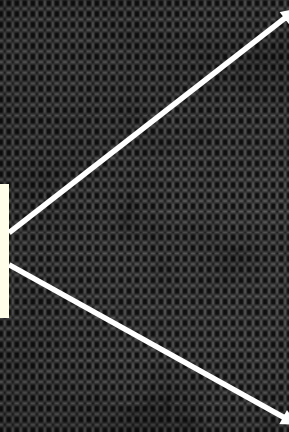


# (一) 资料准备

水文、气象资料

率定期资料

检验期资料



# (一) 资料准备

表 3-13 紧水滩流域年水文特征值统计

年份	$\bar{P}$ (mm)	$E$ (mm)	$R$ (mm)	$Q_{\max}$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{\min}$ (m <sup>3</sup> /s)	$N$ (次)	备注
1977	1816.6	819.2	1184.2	1344	6.2	4	率定
1978	1215.6	844.1	652.1	603	1.5	2	率定
1979	1360.2	858.0	563.6	519	1.2	2	率定
1980	1767.6	947.2	938.0	1340	5.2	4	率定
1981	1539.2	862.7	887.0	1090	9.2	2	率定
1982	1683.6	833.0	1000.8	3050	11.4	4	率定
1983	1917.1	820.8	1372.0	1360	8.5	8	率定
1984	1692.2	817.7	1054.0	1990	10.0	7	率定
1985	1376.8	855.2	830.9	952	12.0	4	率定
1986	1306.3	1019.3	640.1	1330	7.3	3	率定
1990	1739.4	1178.1	916.5	1580	7.9	3	检验
1991	1398.5	1277.6	648.7	783	2.3	2	检验
1992	1973.3	1204.3	1530.7	2410	10.0	9	检验



## (二) 参数率定

参数率定方法

```
graph LR; A[参数率定方法] --> B[水文分析法: 根据其参数物理意义分析观测资料, 确定参数]; A --> C[人工调试法]
```

水文分析法: 根据其参数物理意义分析观测资料, 确定参数

人工调试法

# 1、水文分析法 - K 的估计

$$E_t = P_t - R_t + W_t - W_{t+1}$$

对于 $t_1$ 到 $t_2$ 时段T: 
$$\sum_{t=t_1}^{t_2} E_t = \sum_{t=t_1}^{t_2} P_t - \sum_{t=t_1}^{t_2} R_t + W_{t_1} - W_{t_2}$$

选择一个时段T, 满足2个条件:

1) $t_1, t_2$ 时刻全流域蓄满

$$W_{t_1} = W_{t_2} = WM$$

2)T内蒸发均发生在上层(按蒸发能力蒸发)

$$\sum_{t=t_1}^{t_2} E_t = K \sum_{t=t_1}^{t_2} E_{0,t}$$

$$K = \frac{\sum_{t=t_1}^{t_2} P_t - \sum_{t=t_1}^{t_2} R_t}{\sum_{t=t_1}^{t_2} E_{0,t}}$$



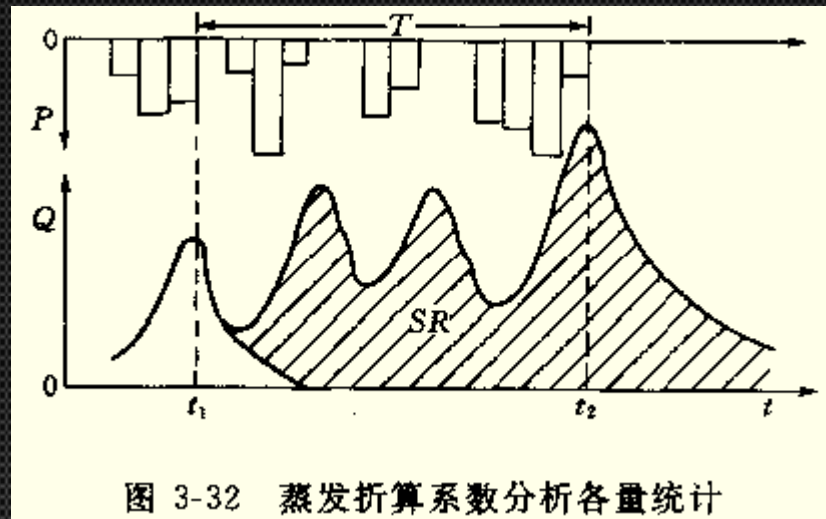


图 3-32 蒸发折算系数分析各量统计

如图所示的 $T$ 时期内，有观测的降雨量和蒸发量，即可直接累加求得总量；但产流量不能直接获得。从流量过程线可知，时段 $T$ 内降雨引起的总产流量 $SR$ 可以通过对流量过程线的分割计算获得。

上式求得K值，受观测资料误差影响。

T越短，相对误差越大；

选若干不同时期（月或季节）作分析，取各分析的平均值作为K的估计值。

如果所选资料能满足上述条件，T较长，时期数多，则K代表性好，精度高。



# 1、水文分析法 - WM 的估计

参数WM反映流域平均的可能最大缺水量

$$WM = \max_{t \in [0, +\infty)} \{W_t\} - \min_{t \in [0, +\infty)} \{W_t\}$$

选择前期特干旱(土壤含水量很小, 可忽略), 一场降雨引起大洪水(雨末蓄满)的资料:

$$WM = W_{\text{末}} - W_{\text{初}} = P - E - R$$

# 1、水文分析法 - WM 的估计

在湿润地区，一般年份土壤都较湿润，十分干燥年份很少，在很干燥时期后又发生全流域蓄满的大洪水更难发生。

因此，根据有限的观测资料，用不很干燥前提下的水文、气象值，按照上述方法求得的WM值常常是偏小的。



## 2、人工调试法

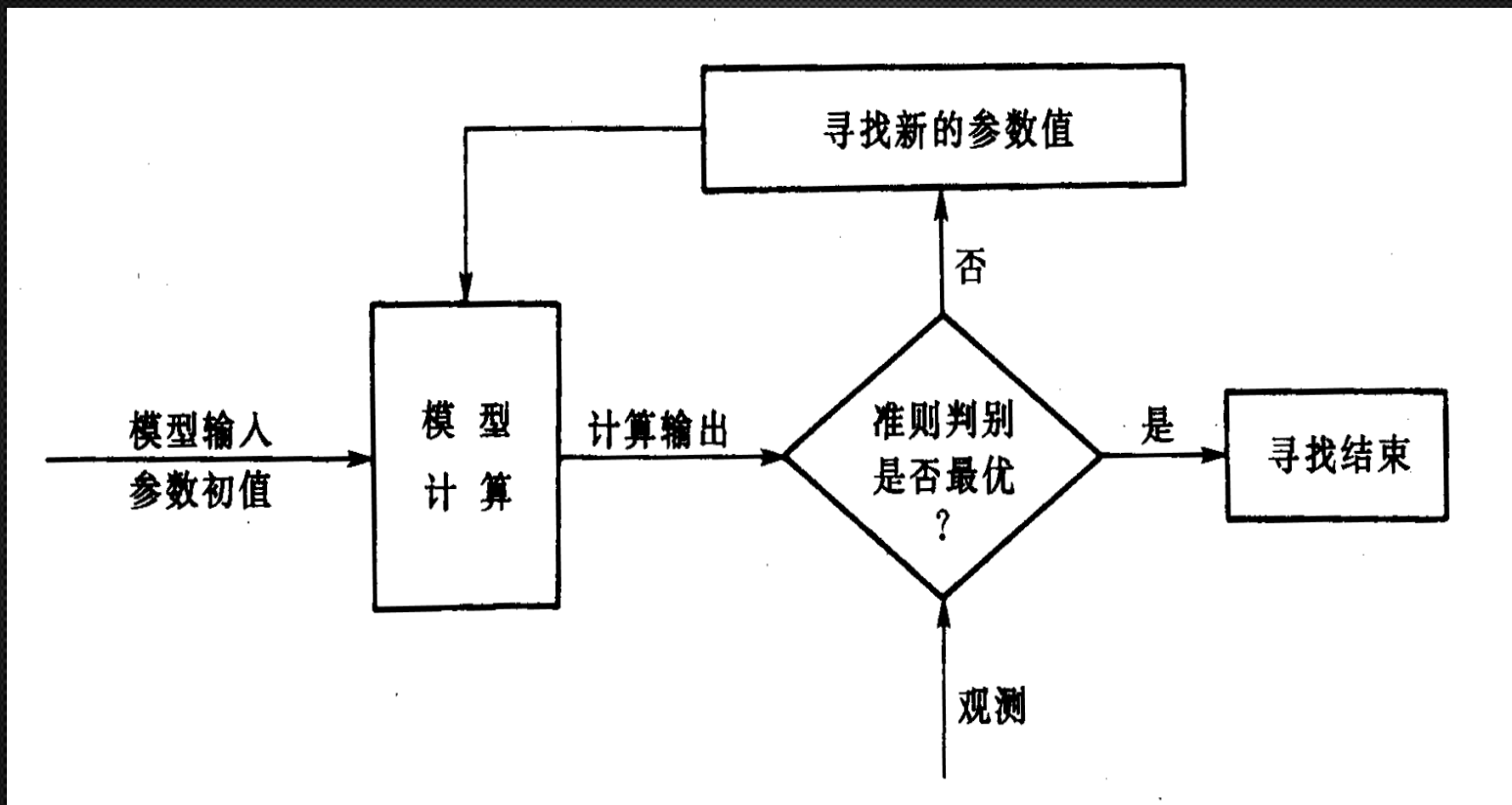


图2-33 模型参数率定框图

## 2、人工调试法

四个基本步骤：

1. 参数初值估计：先验知识估计，如前面的水文分析法估计值，或者相似流域的模型参数。
2. 模型计算：根据输入值、已给参数和模型程序，计算输出值。
3. 结果判别比较：输出计算值与实测比较，满足计算要求，结束。
4. 寻找新的参数：不满足计算要求，重新假定初值。



## 2、人工调试法

### 调整参数应注意的问题：

- 1) 参数物理意义 (参数合理性)
- 2) 参数敏感性 (参数值改变对模型计算结果的影响)
- 3) 科学地调试

### 蓄满产流模型参数：

蒸发参数 -  $K, WUM, WLM, C$

产流参数 -  $WM, b$

## 蓄满产流模型参数 - **K**

最灵敏，影响初始土壤含水量和雨期蒸发

不同K值对年径流的影响比次洪径流大，why?

参数率定中常以年径流为标准

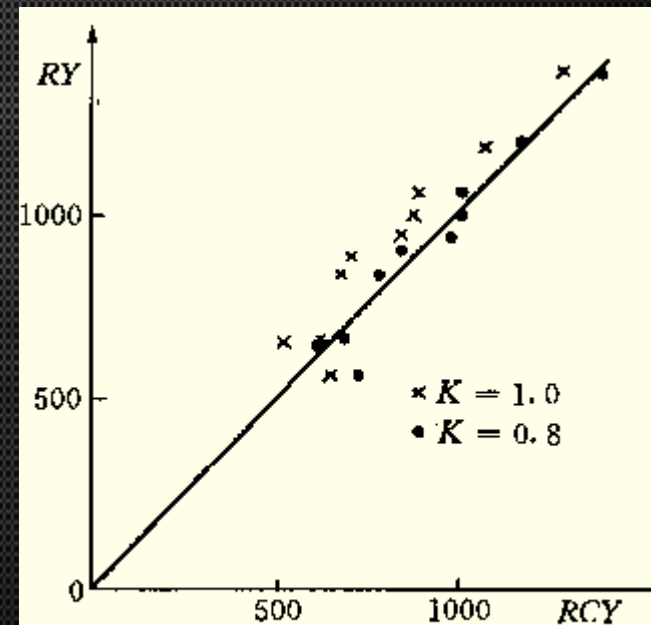


图 3-34 K 值对计算年径流深的影响



## 蓄满产流模型参数 - **b**

土壤含水量分布曲线指数**b**是反映流域下垫面不均匀程度的参数，**b**值越大表示流域越不均匀。

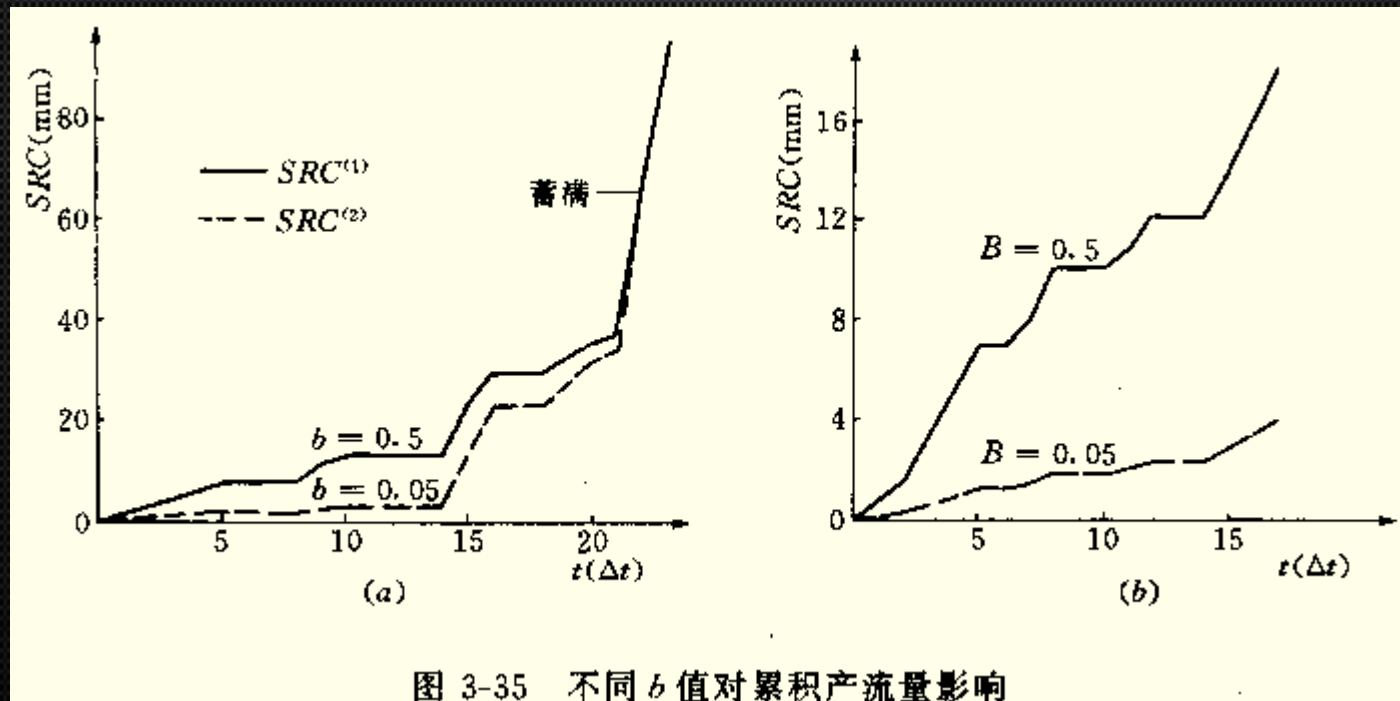
1)雨初全流域蓄满：既不影响产流总量，也不影响产流时程分配( $R=PE$ )

2)雨初未蓄满但雨末蓄满：不影响产流总量，但影响产流时程分配( $R=PE+W-WM$ )

## 蓄满产流模型参数 - **b**

3)雨初雨末均未蓄满：既影响产流总量，也影响产流时程分配

$$R = PE + W - WM + WM \left( 1 - \frac{PE + a}{WMM} \right)^{b+1}$$





## 蓄满产流模型参数 - WM

气候参数，代表流域内气候的干旱程度和影响土壤水分变化的土层深度，不是很灵敏

**Note: WM不能取得过小，以免计算中W出现负值**

经验值：

南方湿润地区：100 ~ 140mm

半干旱地区：140 ~ 200mm

干旱地区：200 ~ 300mm

蓄满产流模型参数 - **WUM**

与作物根系土层厚度有关：5 ~ 20mm

蓄满产流模型参数 - **WLM**

与包气带的土层结构和物理特性有关：60~90cm

**南方湿润地区：WUM+WLM=100mm约束**

**WUM比WLM灵敏**



## 蓄满产流模型参数 - C

影响深层散发，反映深根植物作用的参数

湿润地区基本不起作用，但久旱后会起作用

干旱地区作用明显：0.1 ~ 0.2

### (三) 模型检验

产流模型误差

```
graph LR; A[产流模型误差] --> B[资料误差]; A --> C[模型结构误差]; A --> D[参数率定误差]; A --> E[人类活动影响];
```

资料误差

模型结构误差

参数率定误差

人类活动影响



# 资料误差

## 资料误差

原始资料误差：观测、刊印、储存

统计分析误差：P,R误差

## P(降雨)计算误差

雨量站代表性，见下图

计算方法(3种)

R(降雨)计算误差：采用统一退水曲线划分洪水，忽略了不同洪水退水段的径流组成成分间的差异。

# 资料误差

## 雨量站代表性

左图是紧水滩流域1983年6月一场洪水的降雨量分布。该场降雨与高程分布十分密切，沟谷降雨量为20~35mm，两侧沿坡逐渐增大，关甫垱站为137mm，若缺关甫垱站雨量，会给面平均雨量带来约15%的误差。

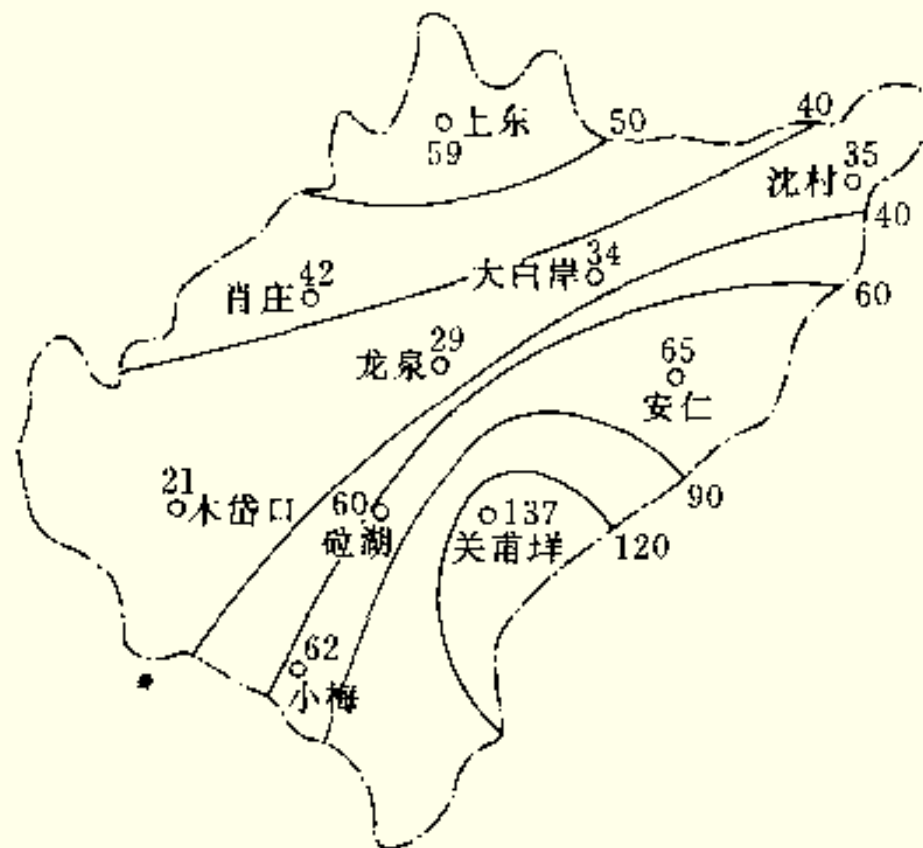


图 3-36 紧水滩流域 1983 年 6 月  
一场洪水的降雨量分布



# 模型结构 误差

**设计与实际产流过程不相吻合**

**蓄满产流模型：**

- 1)各种水分之间交换的计算式同实际水分运动不符
- 2)蒸散发计算模式与流域蒸散发变化规律不符
- 3)局部发生超渗，计算结果偏小
- 4)集总模型的不均匀产流设计模式同降雨分布很不均匀时的局部产流不同

# 模型结构 误差

## 设计与实际产流过程不相吻合

如某流域， $WM=100\text{mm}$ ，全流域分甲、乙两区，面积相同，甲区降雨量 $P=130\text{mm}$ ，乙区 $P=10\text{mm}$ ，设初始土湿为 $W=60\text{mm}$ 。

若按全流域平均计算为全面积产流，得 $P(\text{平均}) = 70\text{mm}$ ，产流量 $R=30\text{mm}$ 。

若按分区计算，甲区为全面积产流， $P=130\text{mm}$ ， $R=90\text{mm}$ ，乙区为局部蓄满产流， $P=10\text{mm}$ ，查 $P$ - $W$ - $R$ 图，得 $R=4\text{mm}$ ，则流域平均 $R=47\text{mm}$ ，大于集总模型计算值。

此例说明，在流域面积较大、降雨分布不均匀时，宜先划分计算单元，按单元计算产流量后再求流域平均径流深。



# 人类活动影响

## 举例：中小型水库蓄放水

1)久旱后，水库、农田拦蓄水，计算 $R$ 偏大

2)久雨后降大雨，水库泄洪，农田防水，计算 $R$ 偏小

总之，在设计产流模型结构时，应尽力符合流域产流的实际状况，对模型结构的检验和修改要在大量计算、分析的基础上谨慎处理。

Check  $R_{\text{计}}$ :

**有无系统偏差**

**点绘实测值与计算值的关系**

**若点子较均匀分布在关系线两侧，正负偏差基本均衡，表示计算无系统偏差。**

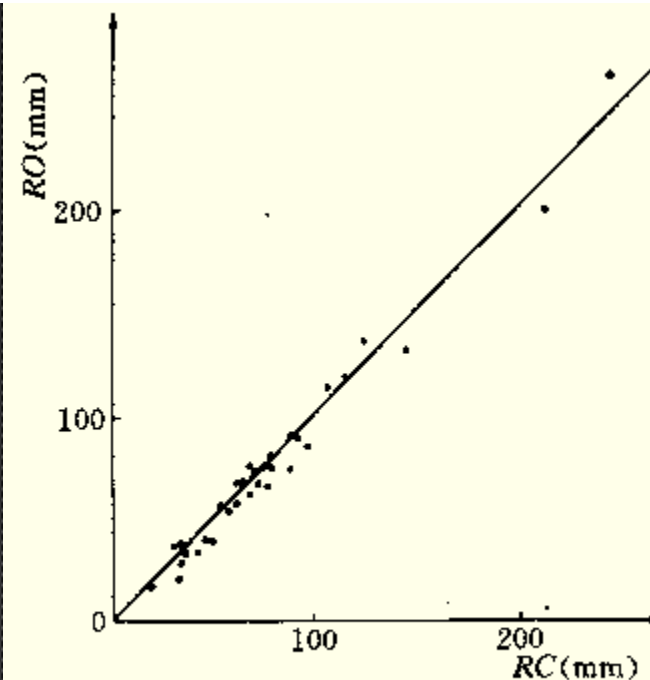


图 3-38 次洪产流计算系统偏差分析



# Check $R_{\text{计}}$ :

系统偏差原因:

1)雨量站代表性不强

2)流域不闭合

3)参数值确定不合理

对误差较大的和不合格的点据要作具体分析，对属于观测资料误差的点子可以舍弃；如属于参数确定误差或模型结构误差，则应作相应修正。

对检验资料的模拟结果，还要作外延误差和参数值是否有时变性等分析。外延误差可以定量化表示为：

$$\delta_E = \frac{(\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |RO_i - RC_i| - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |RO_j - RC_j|)}{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |RO_i - RC_i|}$$

式中 $\delta_E$ —相对外延误差

M、N—率定期和检验期的洪水次数

$i$ 、 $j$ —率定期和检验期的洪水序号

RO、RC—实测和计算的次洪径流深



## 例题

某流域面积为 $402\text{km}^2$ ,产流方式属于蓄满产流。已知 $WM = 100\text{mm}$ ,  $WUM = 20\text{mm}$ ,  $WLM = 80\text{mm}$ ;  $b = 0.3$ ,  $f_c = 5\text{mm}/3\text{h}$ 。某次降雨过程的逐时段降雨量及蒸散发能力如表第二栏和第三栏所示。降雨开始时 $W_0 = 61.83\text{mm}$ , 其中 $W_{0u} = 0$ ,  $W_{0l} = 61.83\text{mm}$ 。流域蒸散发计算采用二层计算模型。试求该次降雨的 $R$ 、 $RS$ 、 $RG$ 和 $W$ 的逐时段变化过程。计算时段 $\Delta t = 3\text{h}$

月日時	P(mm)	E <sub>P</sub> (mm)	E(mm)	R(mm)	RS (mm)	RG (mm)	W <sub>u</sub> (mm)	W <sub>1</sub> (mm)	W (mm)
27.17	0	0							
20	0.5	0							
23	38.1	0							
2	28.9	0							
5	6.8	0							
8	19.7	0							
11	46.7	0.143							
14	24.5	0.143							
17	3.8	0.143							
20	2.3	0.143							
23	4.6	0.154							
2	0.1	0.154							
5	0.7	0.154							



解：6月27日17时为计算起始时刻，此时流域蓄水容量为61.83mm，其中上层为0，下层为61.83mm，6月27日20时，蒸散发能力为0，降雨量为0.5mm。

1)计算6月27日17时~20时的流域蒸散发量

$$E_U = 0, E_1 = 0, E = E_U + E_1 = 0$$

2)计算6月27日17时~20时降雨量产生的总径流量

$$WMM = WM (1+b) = (1+0.3) \times 100 = 130\text{mm}$$

$$\begin{aligned}
 a &= WMM \left[ 1 - \left( 1 - \frac{W_0}{WM} \right)^{\frac{1}{1+b}} \right] \\
 &= 130 \left[ 1 - \left( 1 - \frac{61.83}{100} \right)^{\frac{1}{1.3}} \right] \\
 &= 68.03
 \end{aligned}$$



月日時	P(mm)	E <sub>P</sub> (mm)	E(mm)	R(mm)	RS (mm)	RG (mm)	W <sub>u</sub> (mm)	W <sub>1</sub> (mm)	W (mm)
27.17	0	0	0	0	0	0	0	61.83	61.83
20	0.5	0	0	0.1	0	0.1	0.4	61.83	62.23
23	38.1	0	0	11.14	9.68	1.46	20	69.13	89.19
2	28.9	0	0	18.09	14.96	3.13	20	80	100
5	6.8	0	0	6.8	1.8	5	20	80	100
8	19.7	0	0	19.7	14.7	5	20	80	100
11	46.7	0.143	0.143	46.56	41.56	5	20	80	100
14	24.5	0.143	0.143	24.36	19.36	5	20	80	100
17	3.8	0.143	0.143	3.66	0	3.66	20	80	100
20	2.3	0.143	0.143	2.16	0	2.16	20	80	100
23	4.6	0.154	0.154	4.45	0	4.45	20	80	100
2	0.1	0.154	0.154	0	0	0	19.46	80	100
5	0.7	0.154	0.154	0.01	0	0.01	20	80	100