

Problem statement

问题的提出

- 问题：从长江汉口站明天的流量过程只是取决于过去几天的降水吗？如何区分？
- 解决方案
 - 步骤一：长江汉口站明天的流量过程由哪几部分组成？
 - 步骤二：每一部分的运动规律

第二章 降雨产流量预报

C O N T E N T S

- 1 产流量计算概述
- 2 产流方法
- 3 流域蒸散发量计算
- 4 实测径流
- 5 前期雨量指数模型
- 6 蓄满产流
- 7 超渗产流模型
- 8 混合

第四节 实测径流分析

实测流量过程线往往是由若干次暴雨所形成的洪水径流组成。

为了研究暴雨与洪水之间的关系，必须对流量过程线加以分割(次洪划分)

由于不同水源水流运动规律不同，要把本次洪水径流分为地面径流、地下径流(径流分割)

次洪划分方法 - 退水曲线法

引言

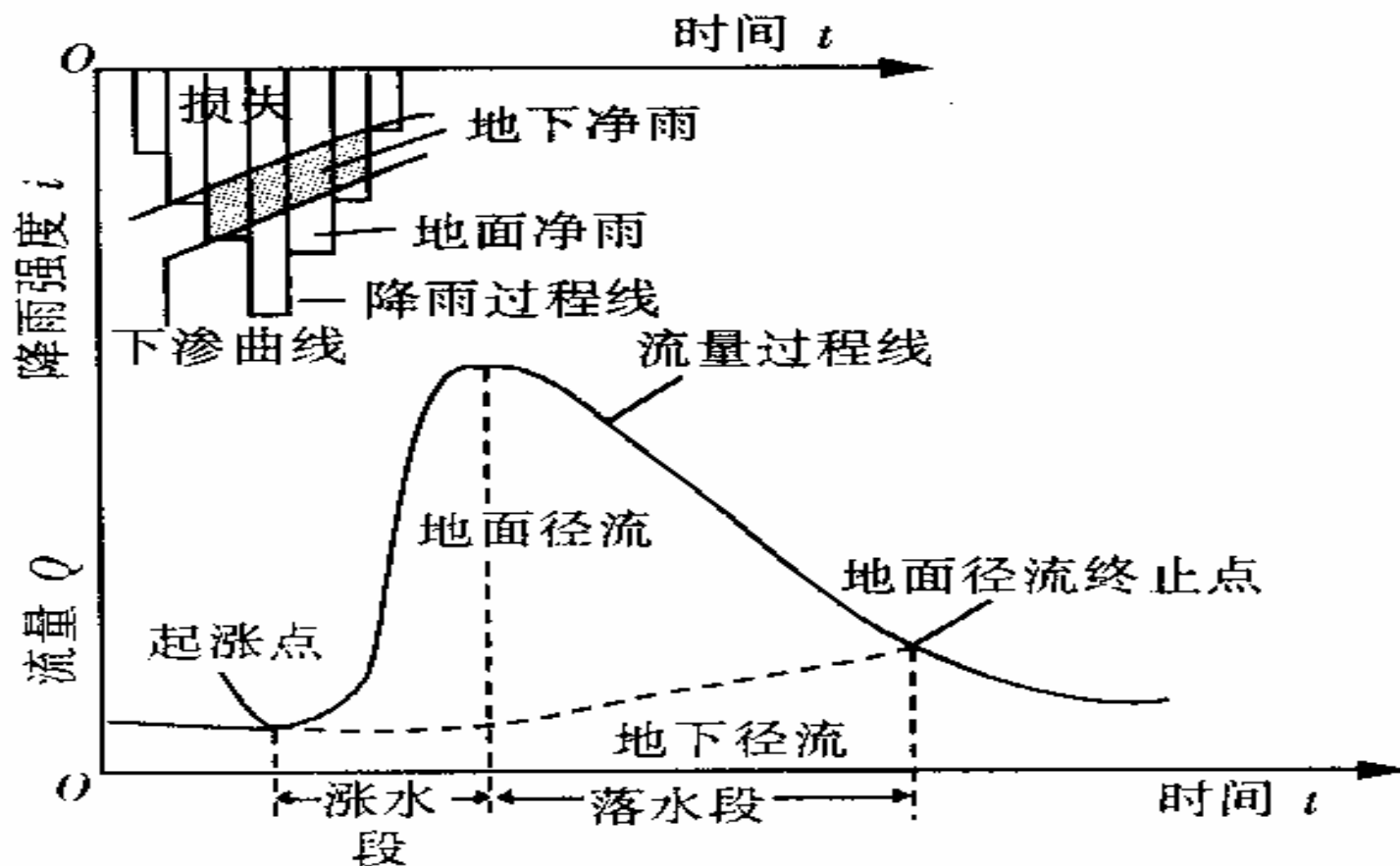


图 1-4 流域降雨径流过程

一、退水曲线分析

流域出口断面的流量过程是由不同水源的径流成分组成，并因其运动路径和受流域调蓄作用不同，使出口断面流量过程特征上互有差异。

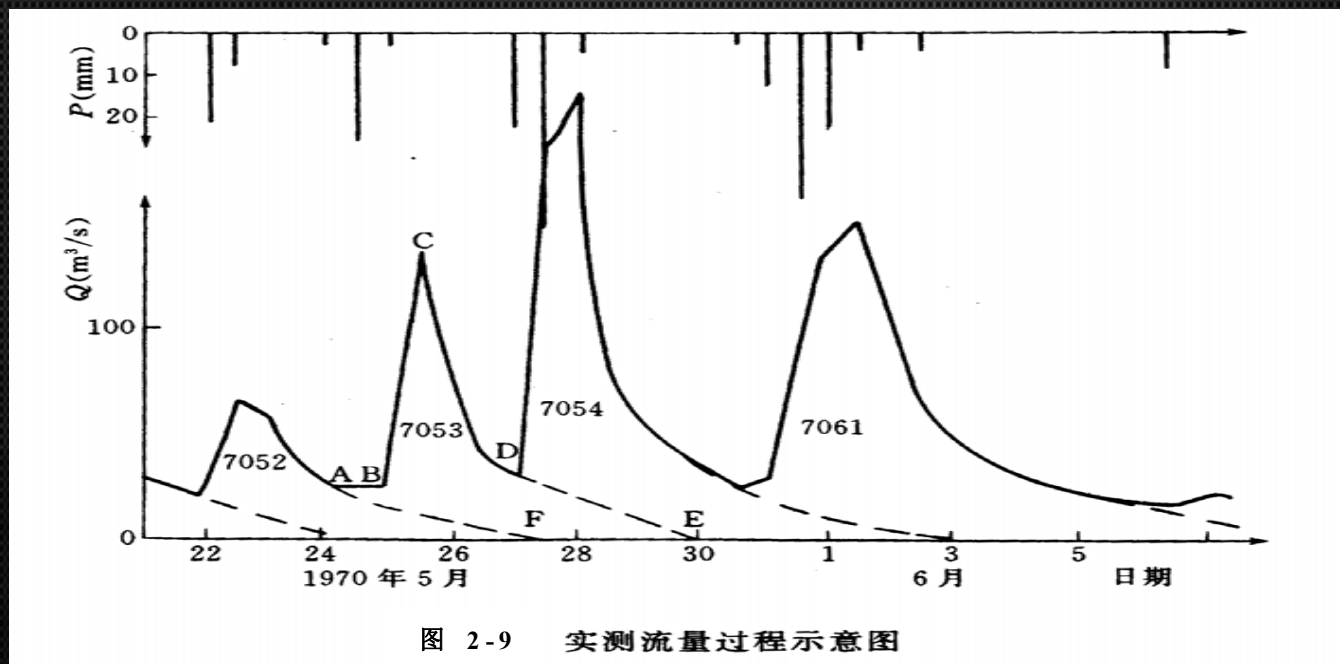
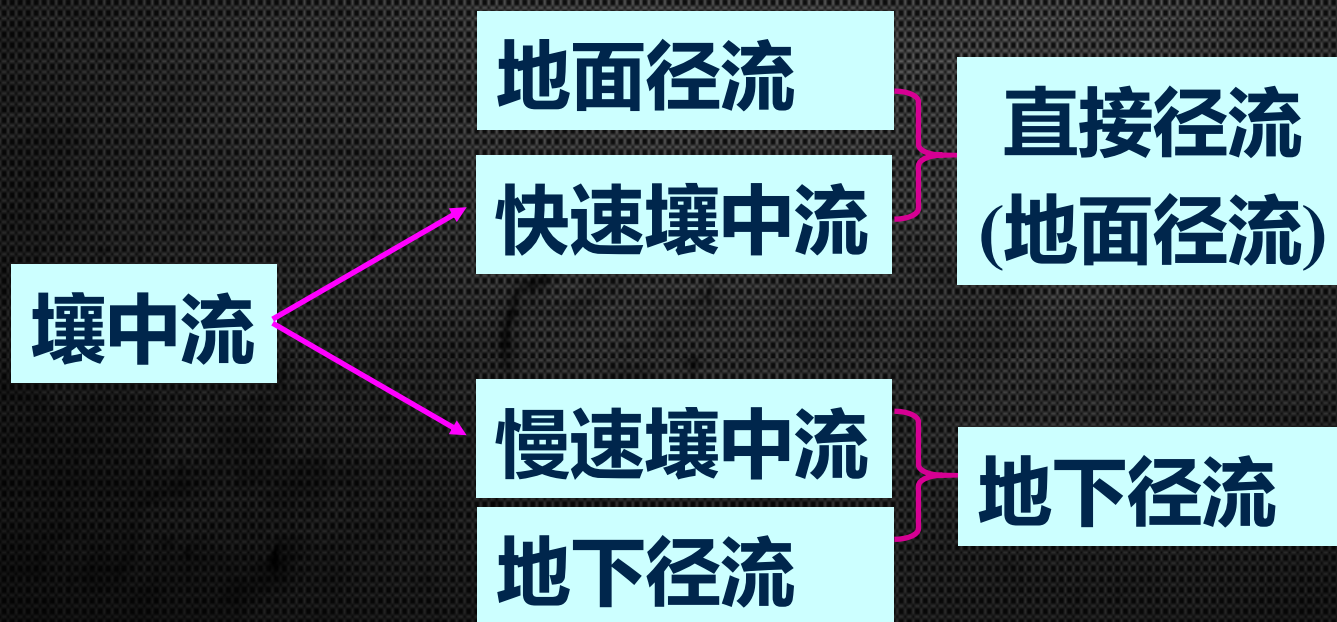


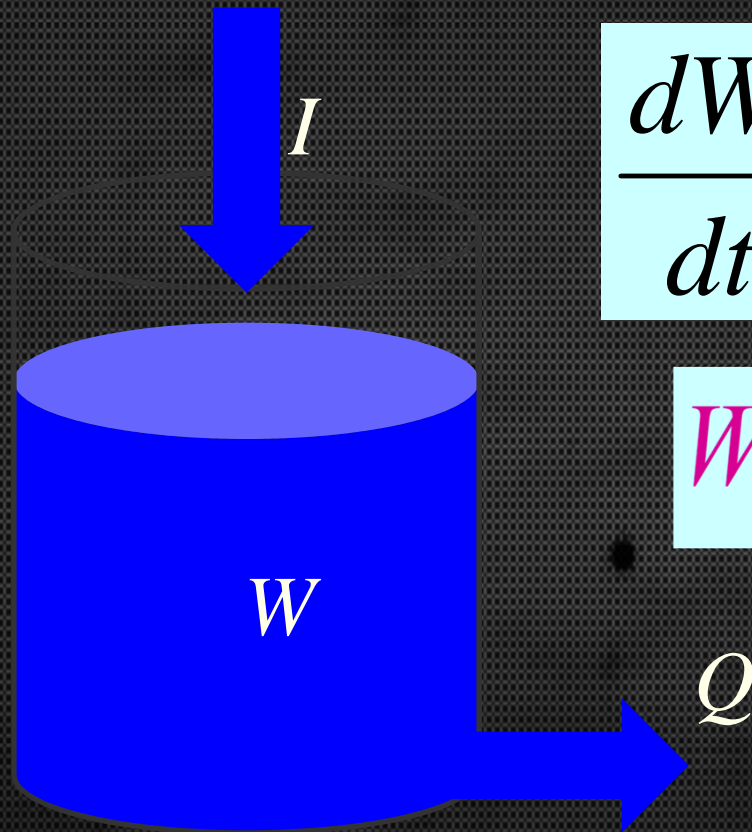
图 2-9 实测流量过程示意图

地面径流：运动速度快、
流程短、受到调蓄作用小；
形成流量过程陡涨陡落，
涨洪和洪峰附近流量过程
主体部分

地下径流：运动速度慢、
流程长、受到调蓄作用大、
汇流时间长；洪水退水尾
部主体部分，常延续至后
续洪水过程中



(一) 退水曲线指数方程



$$\frac{dW}{dt} = I - Q$$

$$W = K Q$$

线性水库模型（水箱模型、木桶模型）

(一) 退水曲线指数方程

$$\left. \begin{array}{l} \frac{dW}{dt} = I - Q \\ W = K Q \end{array} \right\} \text{退水 } I=0 \rightarrow \left. \begin{array}{l} \frac{dW}{dt} = -Q \\ W = K Q \end{array} \right\} \frac{dQ}{dt} = -\frac{1}{K} Q$$

从0 ~ t 积分

$$\int_{Q_0}^{Q_t} \frac{1}{Q} dQ = -\frac{1}{K} \int_0^t dt$$

地下水退水方程

$$Q_t = Q_0 e^{-\frac{t}{K}}$$

K的物理意义:

泄完蓄水量 W_t 所需的时间

平均汇集时间

把地下水退水方程写成递推形式：

$$Q_{t+1} = e^{-\frac{1}{K}} \cdot Q_t$$

令：

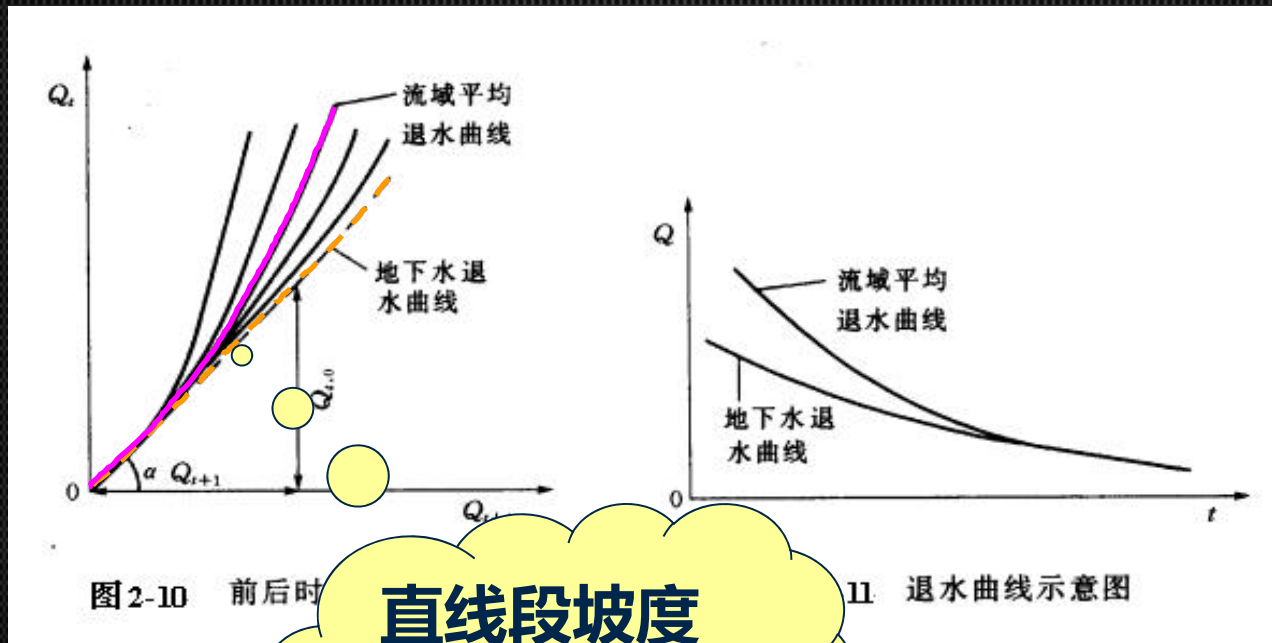
$$C = e^{-\frac{1}{K}} \longrightarrow K = -1/\ln C$$

C ：流量消退系数，反映退水速率快慢。(C<1)

C 的推求方法一：最小二乘法(LSM)

$$\hat{C} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{i,1} \cdot Q_{i,2}}{\sum_{i=1}^n Q_{i,1}^2}$$

(二) 相邻时段流量关系图(C的推求方法二)



直线段坡度
- 地下水消
退系数C

$$\tan \alpha = Q_t / Q_{t+1} = 1 / C \Rightarrow C$$

(三) 组合退水曲线(C的推求方法三)

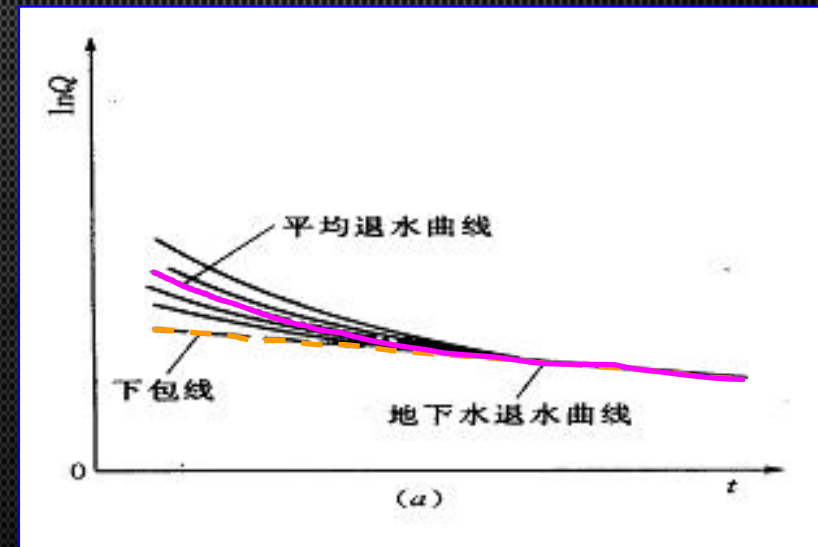
根据退水方程

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\frac{t}{K}}$$

有

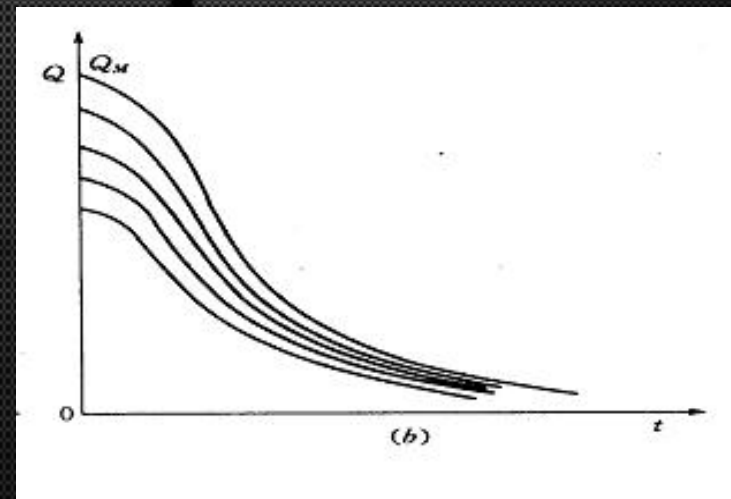
$$\ln Q_t = \ln Q_0 - \frac{1}{K} \cdot t$$

由若干个 Q_t 点绘 $\ln Q_t \sim t$ 图，直线的斜率为 $-1/K$ ，从而定出 K ，然后根据转换关系求出 C 。



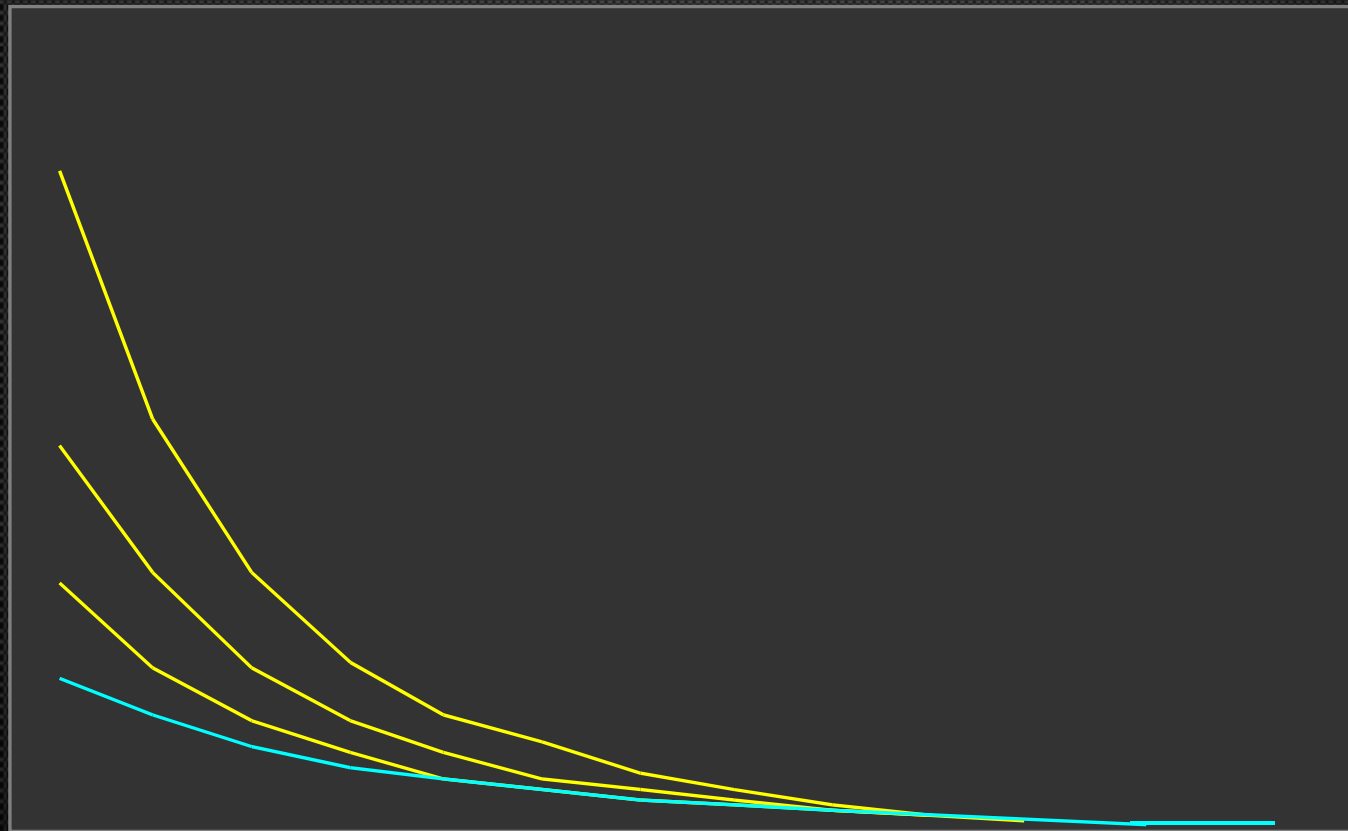
退水曲线制作:

- 1) 点绘各场次洪水的退水过程在半对数纸上(比例一样);
- 2) 用透明的半对数纸, 沿时间轴左右平移, 把原半对数纸上的退水曲线逐条绘于透明纸上, 使它们的尾部重合;
- 3) 作光滑的下包线, 即为流域地下水退水曲线。
- 4) 组合退水曲线常与 $Q_t=f(Q_m, t)$ 退水曲线结合使用。



流域退水曲线

Q
(m^3/s)



退水曲线

t

测试题：推导退水曲线指数方程

$$\frac{dW}{dt} = I - Q$$

$$W = K Q$$

二、次洪径流深计算

流域退水曲线

分割各次洪水

计算次洪总径流深

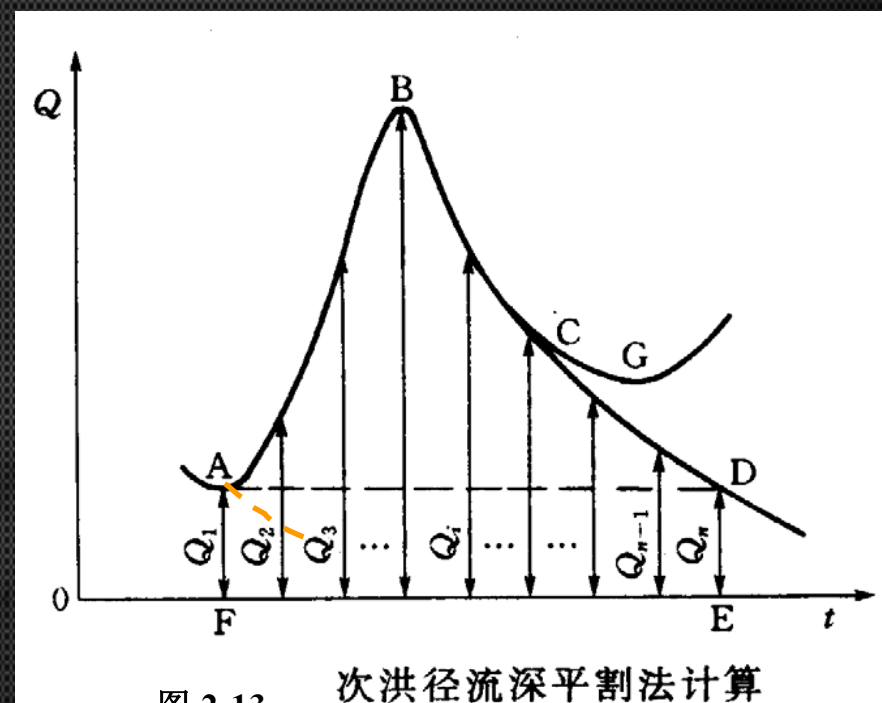


图 2-13

次洪径流深平割法计算

(一) 平割法

适用条件：待分割洪水的起涨流量小于后继洪水的起涨流量

步骤：1) 先用流域平均退水曲线将退水过程延长到与起涨流量相等值(D点)

2) 量取ABCDEFA面积作为本次洪水的径流量

$$R_0 = \sum_{i=1}^{n-1} Q_i \cdot \Delta t \times 3.6 / A$$

转换系数

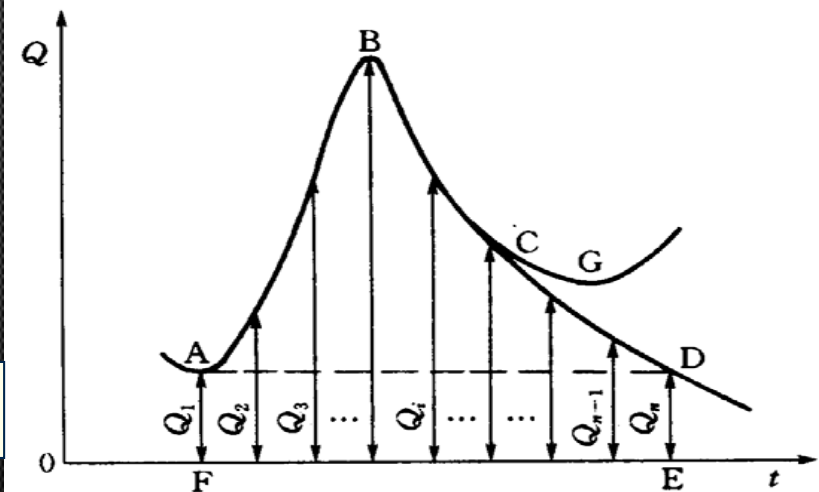


图 2-13 次洪径流深平割法计算

(二) 蓄泄关系法

Key points: 建立退水段流量与相应径流深关系曲线

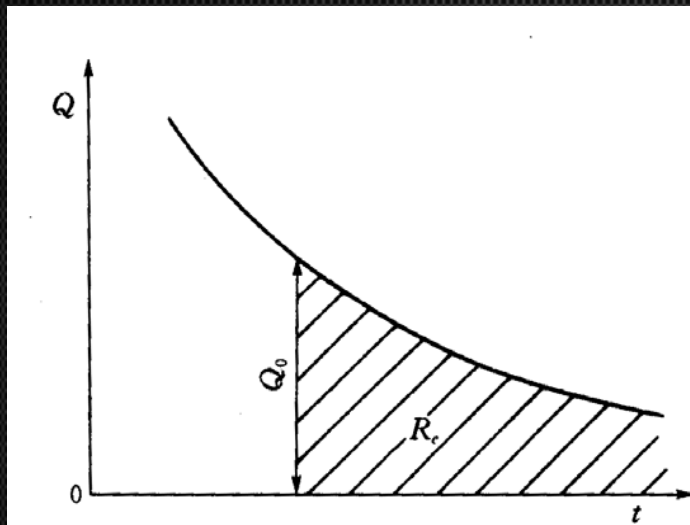


图 2-14 退水径流深计算

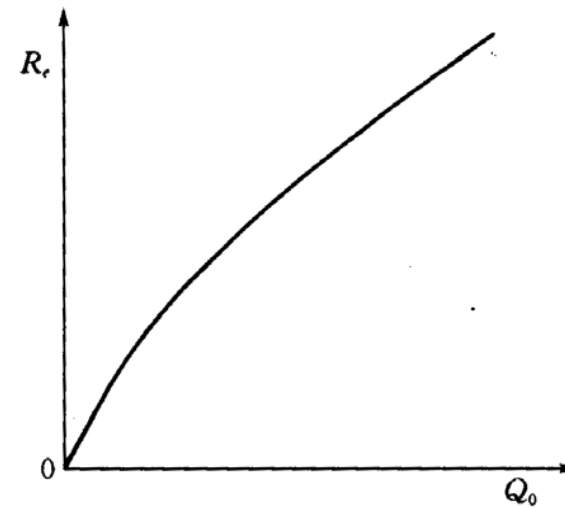


图 2-15 Q_0-R_0 关系示意图

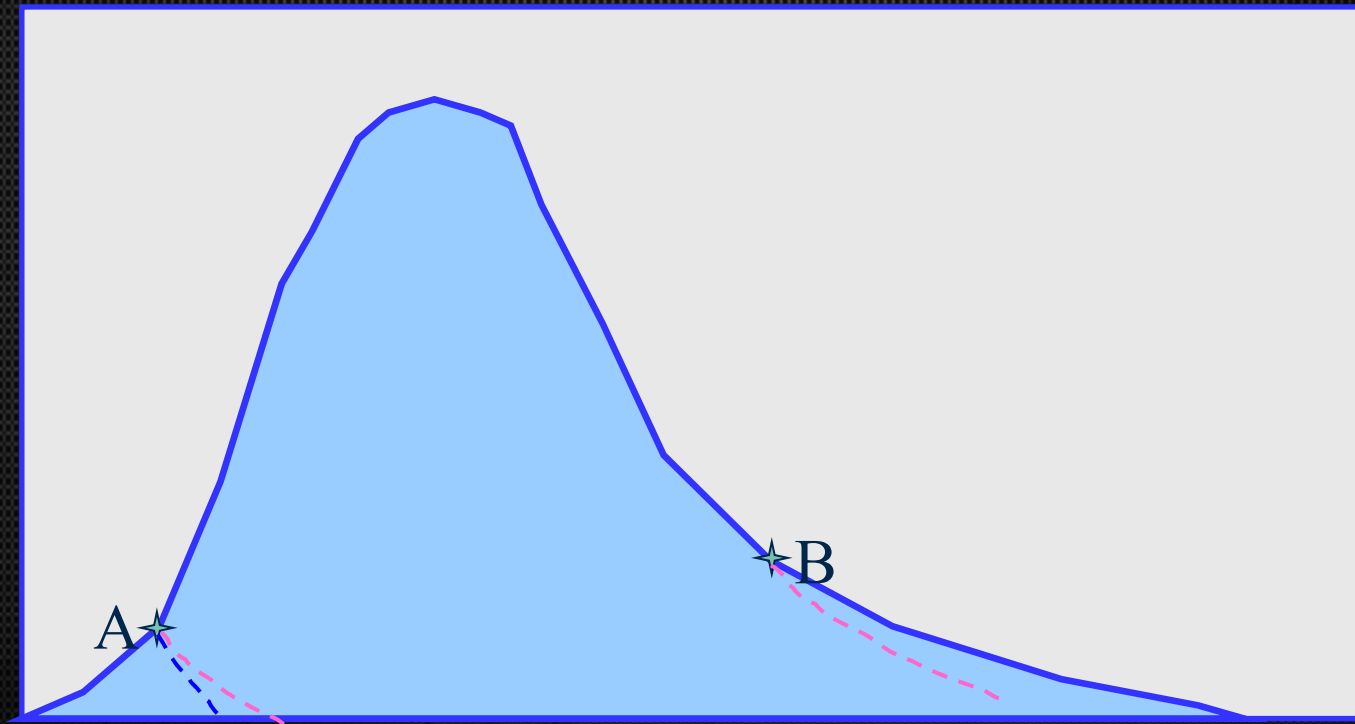
$$R_0 = 3.6\Delta t \left(\sum_{i=2}^{n-1} Q_i + \frac{Q_1 + Q_n}{2} \right) / A + R_{e\text{末}} - R_{e\text{初}}$$

(三) 次洪划分中的问题



采用相同的流域平均退水曲线划分洪水过程合理否

Q
(m^3/s)



t (h)

举例：

假设A地下径流比重小，B地下径流比重大
采用同一流域平均退水曲线划分
导致R计算偏小

改进方法：

- 1)选择起涨点和退水点低，两点相应的流量尽可能接近的洪水
- 2)起涨点高的复峰洪水不作分割or采用 $Q_t=f(Q_m, t)$ 分割

三、径流分割

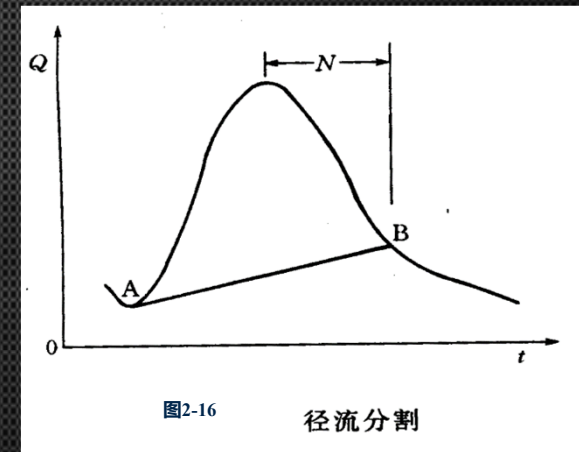
最常用最基本：

次洪总径流

直接径流

地下径流

最常用分割方法：斜线法



斜线法 Key points: 寻找直接径流终止点B

B点确定:

1)退水曲线法: 使退水曲线与流量过程线退水尾部重合, 而流量过程与退水曲线的分叉点即视为直接径流终止点

2)经验法:

N —洪峰到直接径流终止点时距(通过实测资料分析)

$N=0.84F^{0.2}$ (F : 流域面积, km^2)

$N=f(\text{流域面积, 下垫面产汇流特性, 降雨特性等})$

关系稳定, 经验法效果较好; 关系不稳定, 经验法误差较大。

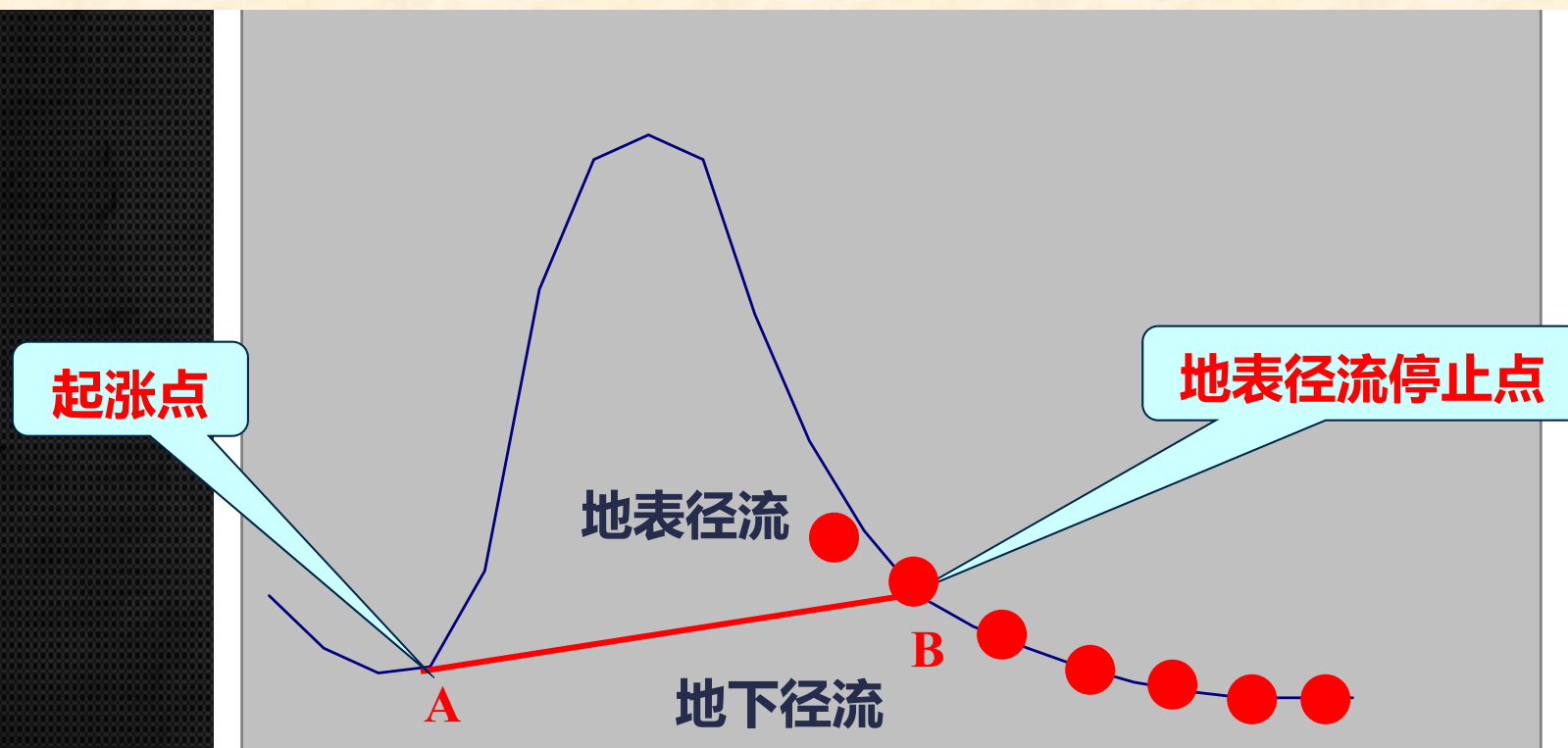
斜线分割法步骤:

1)找到B点;

2)从起涨点A到地面径流终止点B绘制直线AB;

3)AB线以上为地面径流, 以下为地下径流。

1)退水曲线法：使退水曲线与流量过程线退水尾部重合，而流量过程与退水曲线的分叉点即视为直接径流终止点



$$Q_{t+1} = e^{-\frac{1}{K}} \cdot Q_t$$

退水曲线法地下径流分割示意图

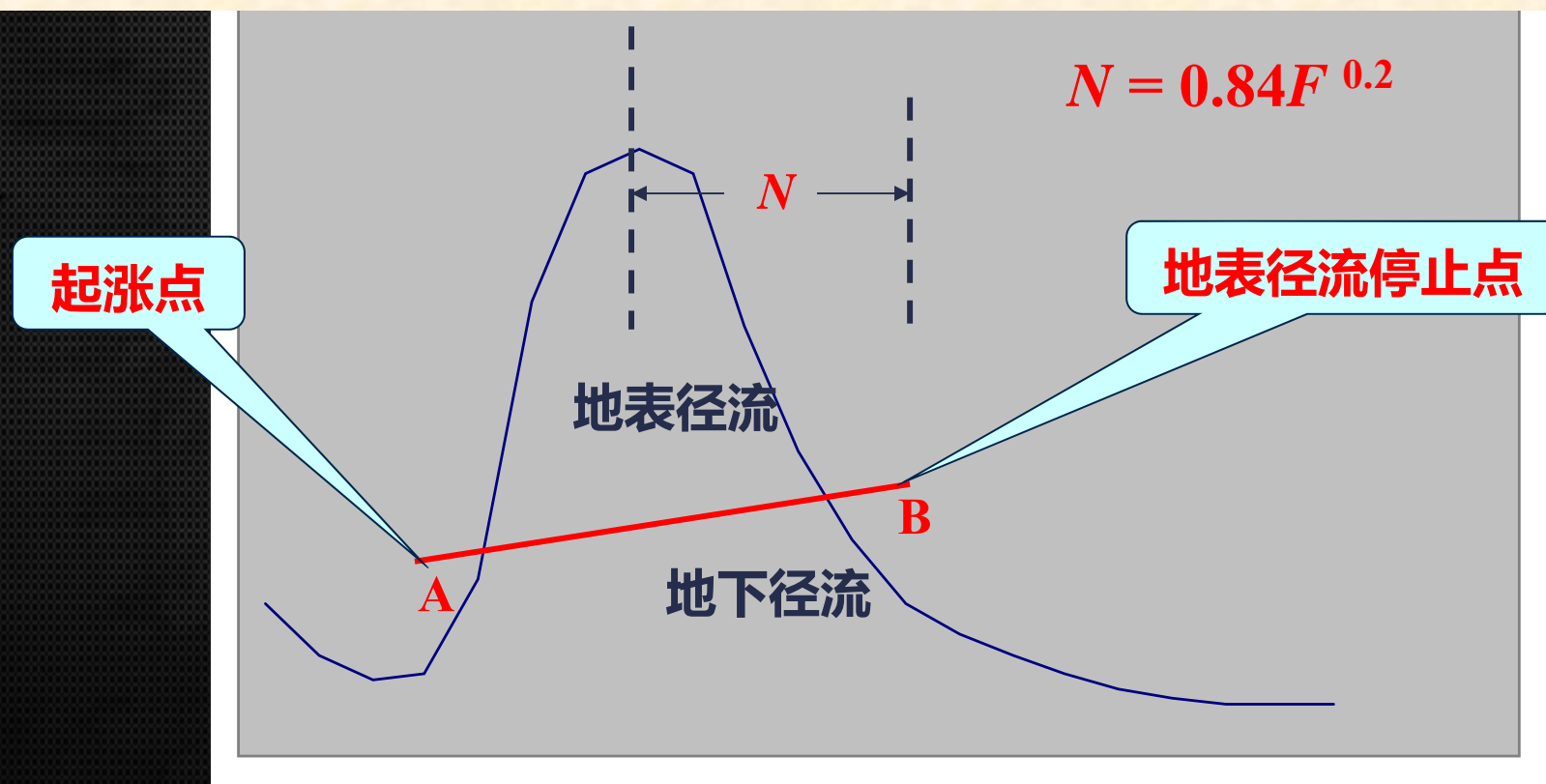
2)经验法:

N —洪峰到直接径流终止点时距(通过实测资料分析)

$N=0.84F^{0.2}$ (F : 流域面积, km^2)

$N=f(\text{流域面积, 下垫面产汇流特性, 降雨特性等})$

关系稳定, 经验法效果较好; 关系不稳定, 经验法误差较大。



经验法地下径流分割示意图

第五节 前期雨量指数模型(API)

五变数(P, R, P_a, T, M)相关图发展而来

实用表达形式：传统的降雨径流相关图

称：降雨径流经验相关法($P+P_a$ 法)

前期逐日雨量的加权累积数，作为土壤水分的指标。每日雨量的权重通常假定为时间指数函数或倒数函数，降雨日期愈近，权重愈大

1969, Sitter: 地下径流模拟

1932, Sherman: 单位线

连续
API
模型

+

+

=

一、相关图的建立

主要影响因素：

P_a , T (降雨历时), M (季节), 暴雨类型(Type), 暴雨中心(Center)

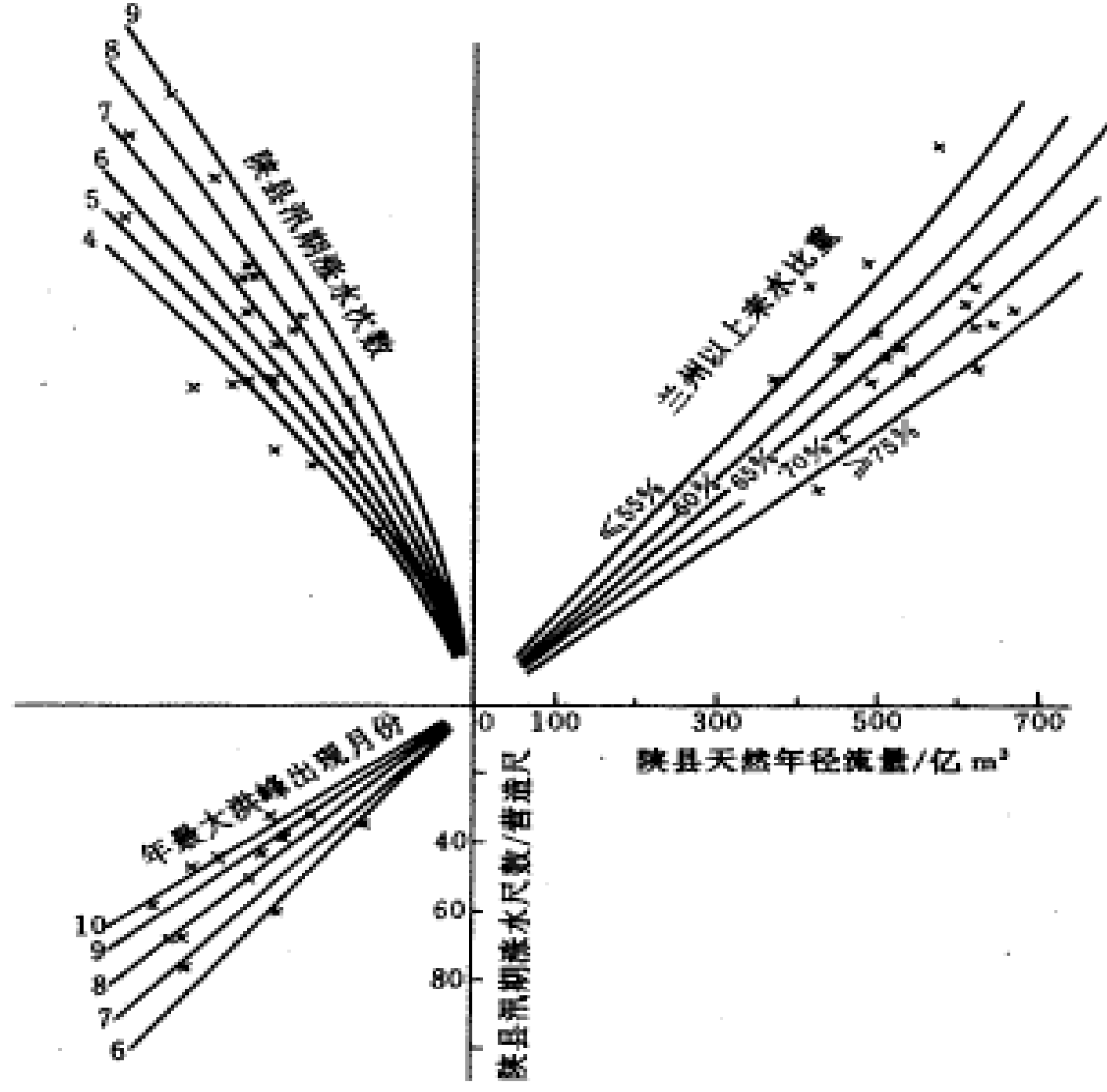
五变数： $R=f(P, P_a, T, \text{季节})$

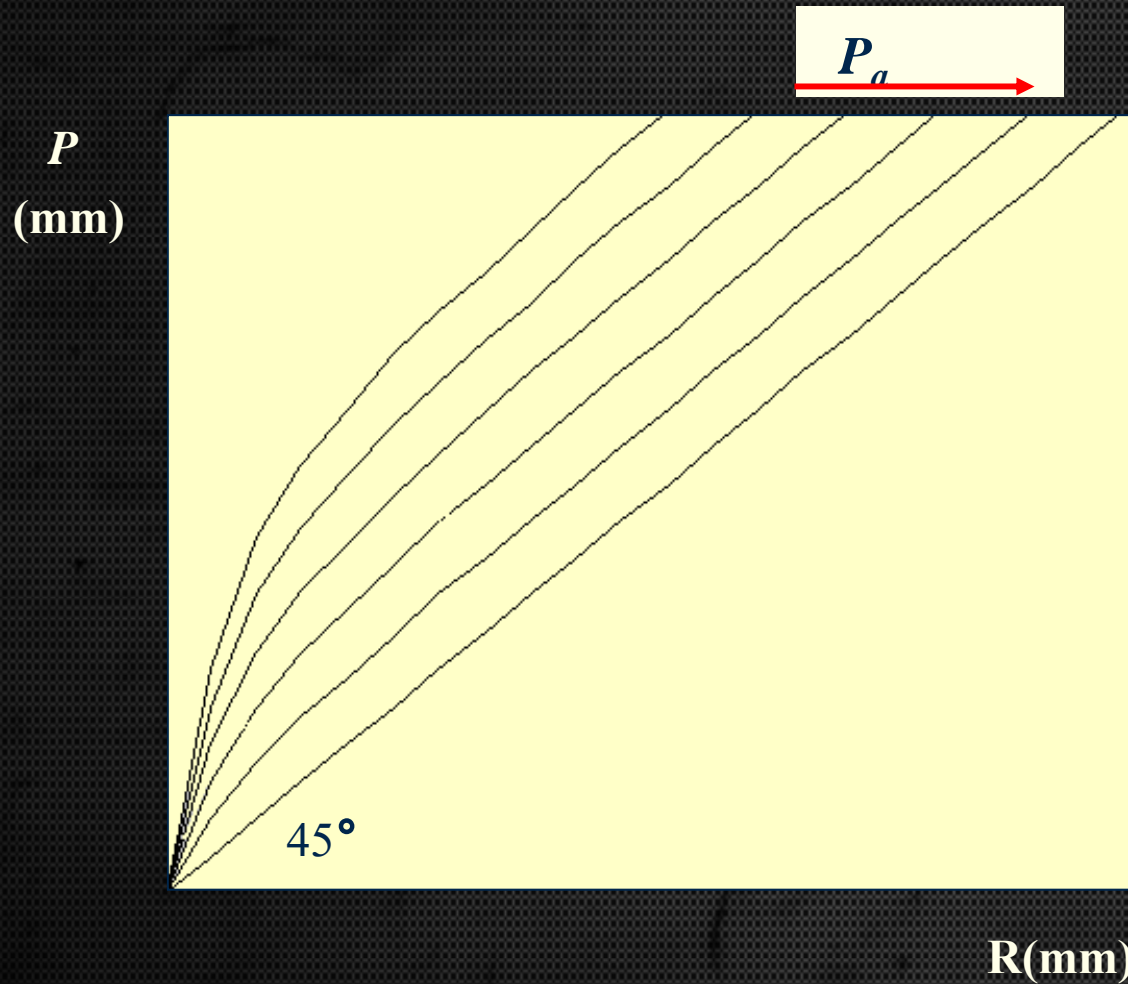


四变数： $R=f(P, P_a, T)$



三变数： $R=f(P, P_a)$





$P \sim P_a \sim R$ 相关图

特征:

1) 曲线簇在45°直线上方(why?); P_a 越大, 越靠近45°直线。

2) 转折点: 以上为45°直线, 以下为下凹的曲线。

3) P_a 直线段之间水平间距相等。

前期影响雨量 P_a 计算



前期影响雨量计算采用递推形式:

$$P_{a,t+1} = K (P_{a,t} + P_t - R_t)$$

前期影响雨量 P_a 的计算公式

- 1. 如果流域内无雨，前期影响雨量 P_a 为：

$$P_{a,t+1} = KP_{a,t}$$

式中 K 为土壤含水量的日消退系数或折减系数。

- 2. 如果第 t 日内有降雨 P_t ，但未产流，则：

$$P_{a,t+1} = K(P_{a,t} + P_t)$$

- 3. 若第 t 日内有降雨 P_t ，并产生径流 R_t ，则：

$$P_{a,t+1} = K(P_{a,t} + P_t - R_t)$$

式中： $P_t \leq WM$ 。若流域较大， P_a 值应按雨量站分块计算，全流域的 P_a 值由各块 P_a 值加权平均。

前期影响雨量 P_a 计算

前期影响雨量计算采用递推形式:

$$P_{a,t+1} = K (P_{a,t} + P_t - R_t)$$

简化形式:

$$P_{a,t+1} = K (P_{a,t} + P_t)$$

上式限制条件:

$$\text{当 } P_{a,t+1} \geq WM \text{ 时, } P_{a,t+1} = WM$$

消退系数K

消退系数K综合反映流域蓄水量因流域蒸散发而减少的特性，因此，可以直接用水文气象资料分析确定。

流域蒸散发一方面取决于蒸散发能力，另一方面取决于供水条件，即流域蓄水量的大小。实用中一般假定流域蒸散发量 E 与流域蓄水量 W 成正比，即：

$$\frac{E_t}{E_p} = \frac{W_t}{WM} \quad \text{或} \quad E_t = \frac{E_p}{WM} W$$

若第 t 日无雨，则该日流域前期影响雨量的减少全部转化为流域蒸散发，故：

$$E_t = P_{a,t} - P_{a,t+1} = (1 - K)P_{a,t}$$

又 $P_{a,t} = W_t$ ，将上式代入前式，即可求得：

$$K = 1 - \frac{E_p}{WM}$$

例 题

【例】某流域最大土壤蓄水量 $W_m=100\text{mm}$ ，流域平均日蒸发能力 $E_p=20\text{mm}$ ，试根据表所列数据计算 5 月 16 日~19 日各日的前期影响雨量 P_a 值。

日期 雨量	5 月				
	15 日	16 日	17 日	18 日	19 日
降雨量(mm)	0	5	150	10	0
P_a (mm)	10				

P ~ P_a ~ R三变量相关图法

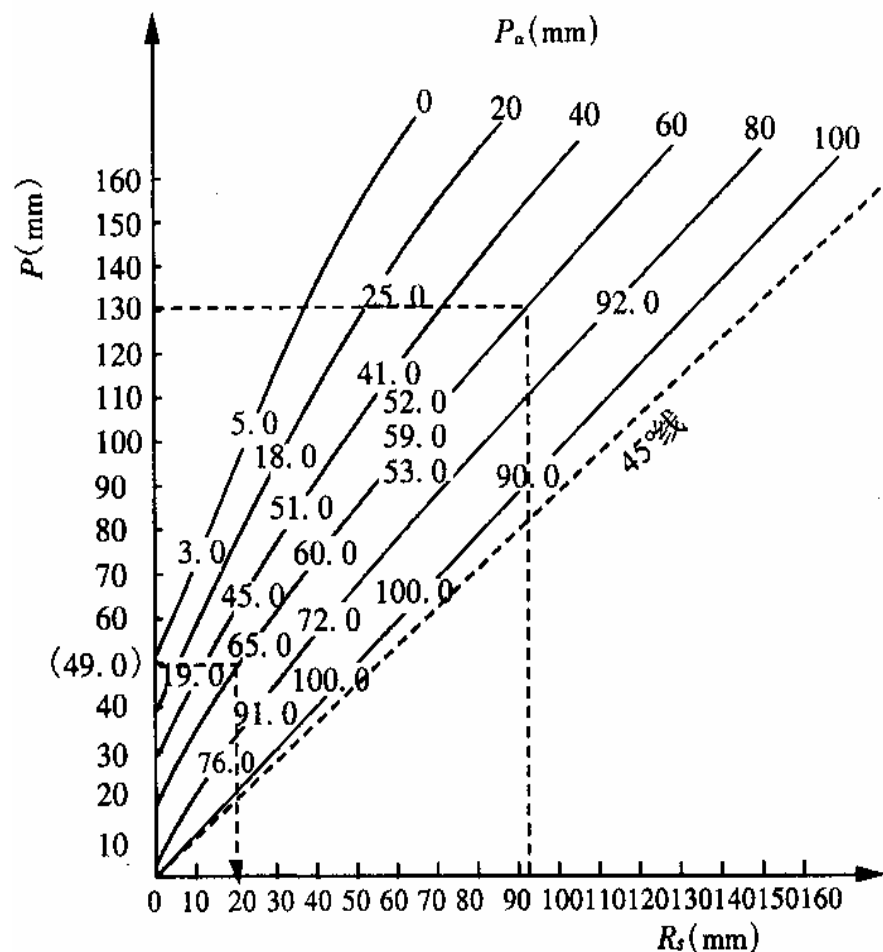


图 2-4 某流域三变量降雨地面径流相关图

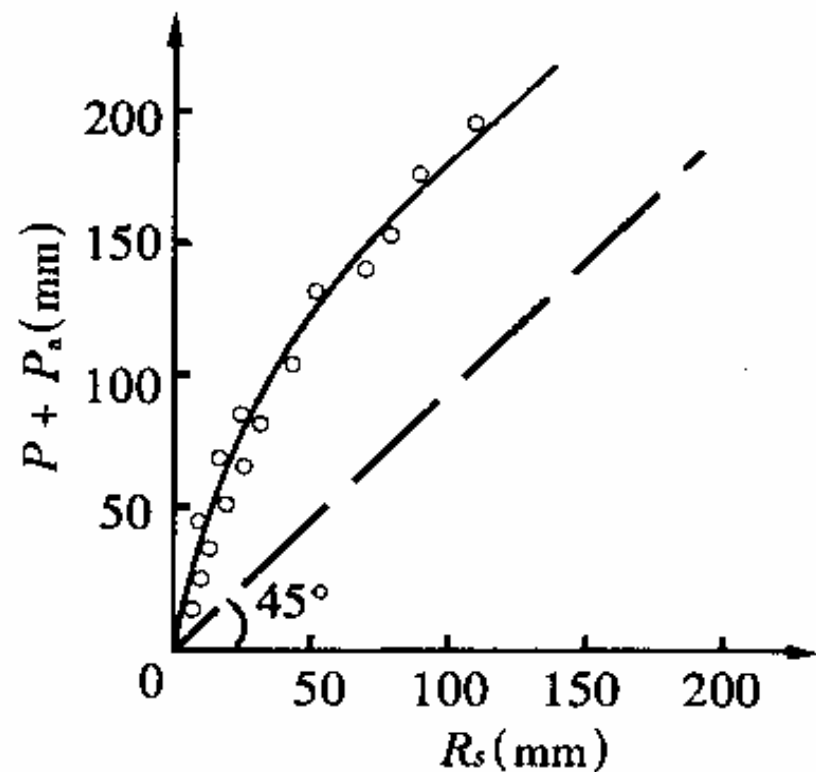


图 2-5 简化的降雨地面径流相关图 $P + P_a \sim R_s$

(一) 三变数相关图制作



多场洪水(P_i, R_i)点绘于坐标图上;
标明各点 P_a 值;
绘制 P_a 等值线簇

(二) 四变数、五变数相关图制作



合轴相关图 (采用主变量移轴法)

Notes:

相关图（经验性），要求足够数量和充分代表性的观测资料

代表性：

- 1)洪水量级代表性：大、中、小
- 2)洪水发生季节代表性：主汛期、非主汛期
- 3)雨型代表性：锋面雨、台风雨、雷雨等
- 4)前期条件代表性：连续降雨、连续干旱等

相关图的应用与发展

上述相关图为一次降雨量与一次洪水径流总量关系。

实际汇流计算中，需求逐时段的净雨量。

相关图的应用与发展

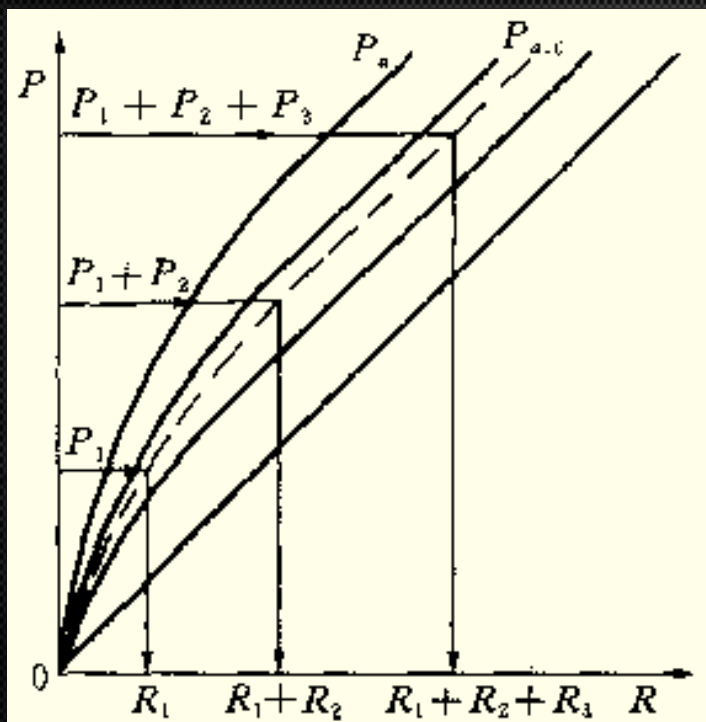
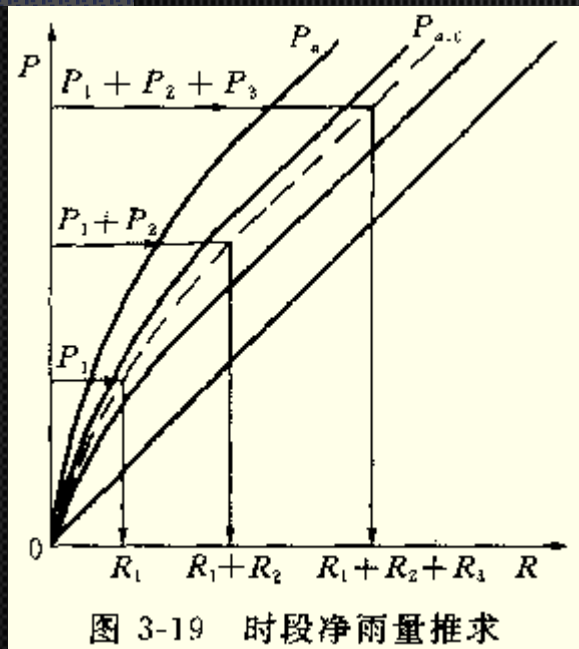


图 3-19 时段净雨量推求

步骤如下：

1. 求本次降雨开始时的 $P_{a,0}$ 。
2. 按逐时段累积降雨量在关系图上查得累积径流量，如下图所示。
3. 由相邻时段的累积径流量之差得时段净雨量。

相关图的应用与发展



注意：时段的划分应使降雨强度尽可能均匀，尤其是对最大强度的时段雨量不要划分到两个时段内；另外如有降雨历时或雨强等参数，求得结果往往带来误差。

相关图的应用与发展

降雨径流相关图预报径流，方法简单，容易掌握使用。并且各个使用部门对其作了许多改进和修改。