

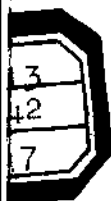
高 塢 溪 分 层 产 流 模 型

——简化的水动力学计算模型

赵 棣 华

水利部南京水文研究所

一九八一年四月



提 要

关于地表径流与壤中径流的产生、汇流特性不同，国内外已有不少分别计称地表及壤中径流的模型。本文试图根据水力学原理及水在土壤中的运动特性作某些简化来计称地表径流及壤中径流的透流量，着重讨论水在土壤中的运动特性，及由此得出的“瞬时入渗反应”。

一、高塘溪模型

(一)产流模型的构想：

1. 地表径流及壤中径流产生的共性和个性：

共性：(1)径流产生于介质特性变化的某一界面上，地表径流产生于空气与土壤的分界面上，壤中径流产生于土壤介质变化的界面——相对不透水层上。

(2)径流产生的必要条件是水的运动速度大于土壤渗透能力。如地表径流产生必须满足 $i > I$ 。(i为雨率，I为地表入渗能力。)壤中径流产生必须满足 $D > I'$ 。(D为水流达到相对不透水层处的速度，即渗透率。I'是相对不透水层的渗透能力。)

(3)对于流域而言，二者都有汇流问题，汇流的问题。

个性：由于水通过的介质特性不同，按壤中径流的特点比地表径流更复杂一些。降水通过大气层时，由于空气阻力甚小，雨水的运动影响很小，而渗入土壤的水，流经的是多孔介质，

本文模型由~~同~~与~~意见~~讨论，张瑛玉，张景驹两同志参加了部分计算工作。

其运动特性既不同于水在大气中的运动，也不同于它在水中的运动，但又与它在水中的运动有某些相似之处，尤其是在土壤裂隙被水充满以后，水在其中的运动与在河段中的运动十分接近。为此，计称相对不透水层处的“输入”既不能直接移用地表入渗过程，也不能直接用河渠水流运动公式来计称，但可以借鑑河段演算的方法。由此，可以认为存在“瞬时入渗反应”。

2. 水在土壤中的运动：

出口断面处实测的壤中流是壤中径流的产流、汇流及河槽汇流的综合结果。地表入渗水首先沿垂直方向运动达到相对不透水层，然后根据 $D > I'$ 的条件产生壤中径流，或经过壤中的流域汇流，河槽汇流最终到达出口断面。

水在土壤中的运动类似水在河段中的运动，但在土壤中的入流量的大小与土壤含水量有关。本模型假定，土壤中的入流量与土壤含水量成反比。另外，水在土壤中运动必须考虑毛细力和分子力的影响，尤其是在土壤含水量未达到田间持水量时，这两种力起着主要作用。

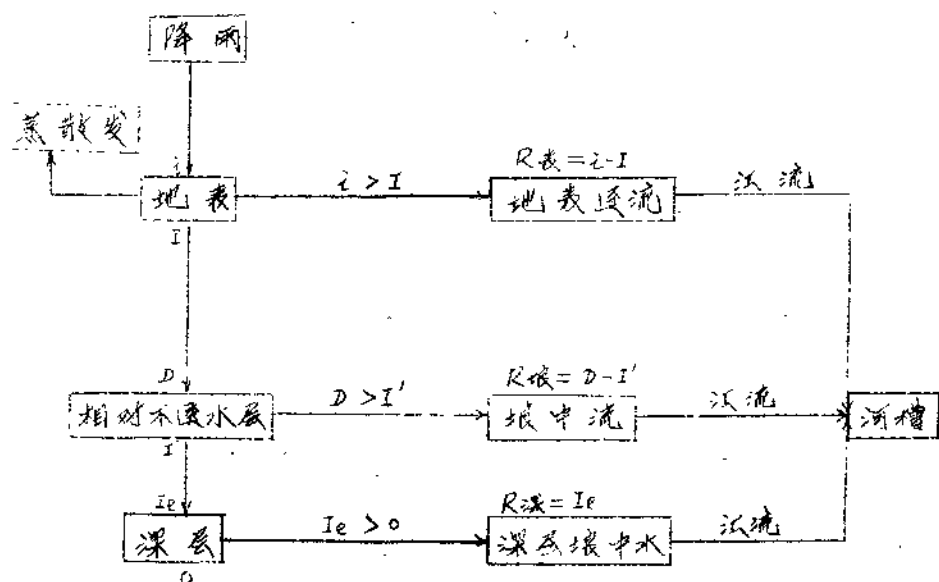
3. 产流过程：

对于单元大体而言，降水到达地面后，当雨强小于地表入渗能力时，降水全部渗入地下，一部分耗于蒸发，一部分继续向下运动，其运动速度逐渐减小。在土壤中的，倘若某界面处的入渗能力小于入渗水的运动速度——渗透率时，则该处产生壤中径流，然后通过壤中的流域汇流进入河槽。假定土壤是均匀一致的，则在相对不透水层处形成壤中径流。如果入渗水达到相对不透水层处速度小于入渗能力，或速度为0，则无壤中径流产生。例如我国北方一些干旱地区，当雨强大于地表入渗能力时，一部分降水渗入地下，其运动规律同上，另一部分降水在地表形成地表水，在满足填洼及蒸发外即形成地表径流，然后通过流域汇流进入河槽成为河川径流。

对于流域而言，尚须考虑流域内各单点的下垫面特性不同，流域的产流与局部产流的问题。

概括上述产流过程，以下列图式表示：

产流示意图



i 为雨量，毫米/小时； I 为地表入渗能力，毫米/小时； $R_{表}$ 为地表径流率，毫米/小时； D 为渗透率，定义为从坡中水渗透到相对不透水层处的速度，毫米/小时； I' 为相对不透水层处的渗透能力，毫米/小时； $R_{坡}$ 为坡中径流率，毫米/小时； $R_{深}$ 为深层坡中水径流率，毫米/小时； I_e 为深层渗透率，毫米/小时；

(三) 数学推导：

1. 径流计算公式：

地表： $R_{表} = i - I - E$

$I = f(S_{表}, S) \approx f(S)$ (忽略地表蓄水影响)

$$\text{壤中: } \begin{cases} R_{\text{壤}} = D - I' \\ D = f(S) \end{cases}$$

深层壤中: $R_{\text{深}} = I_e$ (常数)

这里 I 为雨率, I' 为地表入渗率, E 为蒸发率, $R_{\text{表}}$ 为地表迳流率, $R_{\text{壤}}$ 为壤中迳流率, $S_{\text{表}}$ 为地表蓄水量, S 为土壤蓄水量, $R_{\text{深}}$ 为深层壤中迳流率, I_e 为深层渗透率, I' 为相对不透水层处的渗透能力。

2. I 和 D 公式的推导:

研究水的运动藉水力学中有两种方法, 一是欧拉法, 即取一单元体, 根据力学平衡及质量守恒建立水流连续方程和运动方程, Richards 方程的推导即属于这种方法。另外一种拉格朗日法, 即跟随水质点的运动建立方程, 应用入渗界面的 Green-Ampt 方程就是应用的这种方法。

(1) 简化的连续方程和运动方程:

水流在土壤中的运动的基本方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial v}{\partial z} & (1) \\ v = -K(\theta) \frac{\partial \phi}{\partial z} & (2) \end{cases}$$

式中 θ : 土壤含水率,

v : 土壤水的运动速度

ϕ : 是由下式定义的势

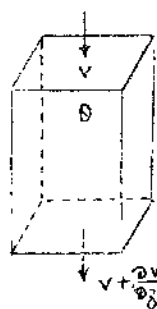
$$\phi = P_r + z$$

P : 土壤毛管压力

z : 土层深度

t : 时间

$K(\theta)$: 水力传导系数,



单元土柱示意图

γ : 土壤容重

众所周知, 上述方程组织组合即为著名的 Richards 方程。

本模型假定: (1) θ 以整层土柱体内蓄水量 S 计, (2) 为充分

概水 (3) $V = I = \frac{S}{S}$, $V + \frac{\partial V}{\partial t} = D = \frac{S}{K}$,

其中 S 、 K 为常数。

则上述方程组变为：

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = I - D & (13) \\ I = \frac{S}{S} & (14) \\ D = \frac{S}{K} & (15) \end{cases}$$

联解方程 (13), (14), (15) 求得：

$$S = \sqrt{\frac{K}{K}} (1 - e^{-\frac{2t}{K}})^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

$$D = \sqrt{\frac{K}{K}} (1 - e^{-\frac{2t}{K}})^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

$$I = \sqrt{\frac{K}{K}} (1 - e^{-\frac{2t}{K}})^{\frac{1}{2}} \quad (18)$$

根据前面的叙述可知： I 为地表入渗率， D 为大坝水渗透到土层分界面处的速度，我们称它为渗透率， $D = R_{\text{坝}} + I'$ 。

当 $t < K$ 时， I 可展开为：

$$I = \sqrt{\frac{K}{2}} t^{-\frac{1}{2}} + \frac{1}{K} \sqrt{\frac{K}{2}} t^{\frac{1}{2}} + \frac{3}{8K^2} \sqrt{\frac{K}{2}} t^{\frac{3}{2}} + \dots \quad (19)$$

当 $t \rightarrow 0$ 时， $I = D = \sqrt{\frac{K}{K}} / K$

当 $D = 0$ 时， $I = \sqrt{\frac{K}{2}} t^{-\frac{1}{2}} \quad (20)$

(19), (20) 二式均属 Philip 型入渗公式，适合于我国北方干旱地区，那些地区一般 K 值大，或无限中速流产生，即 $D = 0$ 。

顺便指出，若运动方程简化为其它形式，则推导的 I 、 D 公式也不相同。例如，

假定方程组为：

$$\begin{cases} \frac{dS}{dt} = I - D \\ I = I_0 + D - K S \\ D = \frac{S}{K} \end{cases}$$

则求得：

$$S = \frac{I_0}{K} (1 - e^{-Kt}) \quad (21)$$

$$D = \frac{I_0}{K} (1 - e^{-Kt}) \quad (22)$$

$$I = \frac{I_0}{K} (1 - e^{-Kt}) + I_0 e^{-Kt} \quad (23)$$

(23) 式即为计及力的 Horton 入渗公式。

当 $D = 0$ 时， $S = \frac{I_0}{K} (1 - e^{-Kt})$ 入渗

$$I = I_0 e^{-kt} \quad (14)$$

此式即为不计重力时的 Horton 公式。\$I_0\$ 为最大入渗率，毫米/小时。

(12) 入渗锋面及“瞬时入渗反应”：

Green-Ampt 假定入渗锋面为划分湿润入渗区与非入渗区的平面。由此推导出入渗公式，该式在一定条件下通过数学变换即为不计重力的 Philip 公式。本模型认为地表入渗水与到达相对不透水层处的渗透水之间存在“瞬时入渗反应”。

假定地表入渗水与到达相对不透水层处的渗透水之间存在一“瞬时入渗反应”；即地面渗入单位水量运动至相对不透水层处的渗透率为一单位过程线。通过对本模型的地表入渗公式及相对不透水层处渗透率公式进行分析可推得“单位线”——“瞬时入渗反应”，故模型不存在划分湿润入渗区与非入渗区的平面。

$$\begin{cases} I = \frac{\sqrt{Kk}}{K} (1 - e^{-\frac{kt}{K}})^{-\frac{1}{2}} \\ D = \frac{\sqrt{Kk}}{K} (1 - e^{-\frac{kt}{K}})^{\frac{1}{2}} \end{cases}$$

$$\text{令 } V = 1 - e^{-\frac{kt}{K}} \text{ 则 } \begin{cases} I = \frac{\sqrt{Kk}}{K} V^{-\frac{1}{2}} \\ D = \frac{\sqrt{Kk}}{K} V^{\frac{1}{2}} \end{cases}$$

$$D = \int_0^V I(u) u(V-u) du \quad \text{式中 } u(V-u) \text{ 为“瞬时入渗反应”，}$$

$$L(u) = L^{(1)} / L^{(2)} = \frac{1}{2p} \quad \text{式中 } L \text{ 为拉普拉斯变换符号，}$$

$$u(V) = \frac{1}{2} \quad \text{即 } u(1 - e^{-\frac{kt}{K}}) = \frac{1}{2}$$

$$\text{同理求得 Horton 公式的 } u(t) = \frac{1}{K} e^{-\frac{kt}{K}}。$$

对于 Green-Ampt 公式，由于入渗锋面是一平面，故相应的“瞬时入渗反应”不是连续曲线，在相对不透水层处渗透率是突变的，在入渗锋面达到相对不透水层前，渗透率为 0，一旦锋面到达相对不透水层，则渗透率为 \$I\$。

(14) 产流计算：

产流公式：

考虑到降雨时程分配的不均匀及流域的下垫面特性的不均一，对于流域产流计称采用下列公式：

当 $i > I$ 时：

$$\begin{cases} R_{表} = i - I \\ \frac{ds}{dt} = I - D \\ I = (i - (i - \frac{s}{S}) \frac{F_d}{F}) \quad \text{其中 } \frac{F_d}{F} \text{ 是地表径流面积分配曲线，全流域产流时 } \frac{F_d}{F} = 1 \\ D = \frac{s}{K} \\ R_{壤} = (D - I') \frac{F_d'}{F} \quad \text{其中 } \frac{F_d'}{F} \text{ 是壤中径流面积分配曲线，当流域蓄水量达到田间持水量时 } \frac{F_d'}{F} = 1。 \\ R_{深} = I_e \end{cases}$$

当 $i < I$ 时，则 $R_{表} = 0$ ， $I = i$ ，计称公式为：

$$\begin{cases} i - D = \frac{ds}{dt} \\ D = \frac{s}{K} \\ R_{壤} = (D - I') \frac{F_d'}{F} \\ R_{深} = I_e \end{cases}$$

由于实测资料是离散型的，故上述公式用有限差形式的表格来进行计称，为了计称方便表格中把 D 与 I_e 合为一项以 D' 记，即 $D' = D + I_e$ ，产流计称表如下：

t (时间) (15分)	I (入渗率) mm/hr	S (蓄水量) mm	$D' = (D + I_e)$ mm/hr	E (总发量) mm/hr	i (雨率) mm/hr	$i - I$
Σ						

由于相对不透水层处 I' 很小，可根据实测资料分析取 0 或取 D 的百分数。本模型对高塘溪资料计称时取 $I' = 0.05 D$ 。即：
 $R_{壤} = 0.95 D$ 。

对于次洪水径流量： $R'_{表} = \Sigma (i - I)$ ；

$$R'_{下} = R'_{壤} + R_{深} = 0.95 \Sigma D'。$$

2. 参数确定：

(1) K 值的确定：

K 值反映了入渗水从地表运动至相对不透水层处平均的时

间。由于土壤含水量在达到田间持水量前，运动水的主要作用力是分子力和毛细力，而达到“团持”后其作用力主要为重力故水在土壤中的运动所需的时间在“团持”前后是不同的，为此，采用 K_1 和 K_2 分别表示到达“团持”前后的运动时间，通常 $K_1 > K_2$ 。

为了计算方便，本模型取 $K_1 = \alpha K_2$ 。 α 为常数。

初始 K_2 值的确定：由于水在土壤中所受重力为同运动的 K 值无法在流域上观测，故应用退水曲线分析计算及根据汇流计算与产流计算的关係来推得 K_2 值。

(2) λ 的确定：

λ 值的单位为 L^2/T ，相当于土壤水扩散度 D (L^2/T)。

初始 λ 值的确定：在有实测地表径流的情况下，可根据实测资料及水量平衡计算求出下渗量及初始土壤含水量，以此求出相应的平均下渗率及蓄水量，然后按 $\lambda = I \cdot S$ 求得初始 λ 值。

没有实测地表径流时，根据已确定的 K 值及下列公式计算确定：

$$\therefore S = \sqrt{\lambda K} (1 - e^{-\frac{t}{\lambda K}})^{\frac{1}{2}}; \quad \therefore S_{max} = \sqrt{\lambda K}$$

$K = \frac{1}{2} (K_1 + K_2)$ S_{max} 为最大蓄水量，可根据土壤性质计算确定。

λ 值的大小不同，直接影响地表径流与土壤中径流的比例。根据实测资料计算的 λ 值，各次洪水 λ 值不同， λ 值与两线有密切的关係，这是由于流域上各点入渗率不同，在不同两线下降流域入渗量不同造成，本模型通过流域面积分配曲线考虑该因素。

3. 其它有关项目的计算：

(1) S_0 的确定：

土壤的初始蓄水量 S_0 对径流量的计算影响甚大， S_0 的误差大小直接影响计算径流量的误差大小。例如高崎溪 770501 次洪水，取 $S_0 = 108.7 mm$ 计算径流 $R = 43.4 mm$ ，取 $S_0 = 89.1 mm$ ，则 $R = 24.0 mm$ ；取 $S_0 = 128.3 mm$ ，则 $R = 60.9 mm$ 。本模型 S_0 计算如下：对于某年第一次洪水根据土壤含水率实测值及流域平均土深，按公式 $S = \gamma H (\theta - \theta_{min})$ 计算，以各次洪水均衡水量平衡及简化动力方程连续运行求得，（见 S_0 计算表）。

实际计称表明，同一降雨量，不同雨型产生的迳流量不同。均匀降雨产生的迳流量相当于平均情况，例如，770704次洪水 S_0 计称中5月31日，日降雨量为24.5mm，若降雨按均匀分配计称迳流量为7.9mm，若降雨集中于第一小时迳流量为16.3mm，若降雨集中于最后一小时，则迳流量为3.0mm，故在 S_0 计称中日雨量计称按均匀分配的降雨计。

实际计称还表明， S_0 的计称值仅影响本次洪水迳流量，另外，当参数 α 、 K 变化时，对 S_0 计称值无影响。

(2) 产流面积分配曲线 $\frac{F}{F_0} \sim S$ 及 $\frac{F}{F_0} \sim S$ 的确定：

产流面积分配曲线反映流域产流的不均匀性。该曲线可假定为某种曲线，也可按实测资料分析确定。本模型的流域面积分配曲线是按实测资料经验确定，在地表迳流产流面积分配曲线中经验性地考虑地面填筑、滞蓄等影响。

(3) 蒸发量计称：

本模型的土壤蒸发量资料是由该流域实测水面蒸发资料，按分月给以不同折扣系数来确定。

分配折扣系数：

月 份	4	5	6	7	8	9	10
土壤蒸发 水面蒸发	0.6	0.7	0.6	0.8	0.8	0.7	0.7

S_0 计称表：

时 间 (t) (日)	日降水量 P (mm)	蓄水量 S (mm)	日渗透量 ΣD (mm)	日蒸发 ΣE (mm)

三、资料验证：

(一) 资料情况简介：

本模型使用浙江省姜湾医院站高坞溪1977年十次暴雨洪水资料进行验证。

高坞溪集水面积 0.024 km^2 ，流域完整，天然分水岭明确。

终年不断流，流域最高点与最低点高差94米，主溪长度113.6米，主溪平均坡度25.4%。

区内植被茂盛，竹林面积占50%左右，土壤为红壤土，土层平均厚度4厘米。岩石以流纹岩为主，裂隙较发达。

流域内布设4个雨量点，均为自记记录。大风时增设流域外的另一个雨量点资料参加流域平均雨量计称。

分层测定地表及地下径流，地表径流由60度三角坑实测地表集流沟的径流，地下径流由出口断面处实测总径流域地表径流。

蒸发资料以1978年起有实测水面蒸发及土壤蒸发量资料。1977年借用为该溪3公里处的和睦桥点实测水面蒸发资料。

流域内布设土壤含水率测线4处，用秤量烘干法测定土壤含水量的变化过程。

四、计称结果：

1. 参数值及 K 的确定：

(1) 初定 K_1 、 K_2 值的确定：根据标准退水曲线分析，及产流、汇流之间的关系，求得初定 $K_2 = 7.2$ 小时， $K_1 = 95.2$ 小时。由此计称的初始值 $= 956.5$ 毫米²/小时。

其中 $S_{m \cdot x} = 0.17H (Q_m - Q_{\min}) = 210.9 \text{ mm}$ 。 $Q_m = 44.7\%$ 由实测资料选取。

根据实测地表径流值计称选定的初始值 $= 1102.6$ 毫米²/小时。

(2) 用最小二乘方确定最优的 K_1 、 K_2 值：本模型分别选取 $K_1 = 800, 1100, 1300$ 毫米²/小时； $K_2 = 7.9, 11$ 小时；进行产流计称，(计称成果见表1)，根据最小二乘方准则选取最优的 K_1 、 K_2 值 $K_1 = 90$ 毫米²/小时， $K_2 = 9$ 小时。由此取 $K_1 = 89.8$ 小时。

2. 参数值的讨论：

首先， K_1 、 K_2 值变化将对径流总量影响不大，它只影响地表径流量与壤中径流量比例，其中 K_1 值变化引起地表径流的变化更为明显。实测的资料计称表明：当 K_1 值变化18%时，径流总量的最大变化为27%，壤中径流量的最大变化为4.1%，地表径流量的最大变化为11.4%。当 K_2 值变化18%时，径流总量的最大变化为15%，壤中径流的变化为4.0%，地表径流的变化为17%。当 K_2 值变化为36%时，径流总量的最大变化仍为15%左右，壤中径流的最大变化为13.2%，而地表径流的最大变化为

30.8%。

从上述结果来看，对于既有地表径流又有壤中径流的地区，按以往的方法，只按径流总量来评定参数 λ 、 K 的优劣是不够的，应按实测总径流过程线拟合的优劣来选择，对于只有地表径流的地区因为 $\lambda \rightarrow 0$ 故 λ 值可按径流总量优选。

此外， λ 、 K 值的变化对 S_0 值的计算无影响。

2. S_0 值计算结果：

各次洪水 S_0 值计算结果见表2。

3. 产流计算结果：

实测与计算径流成果比较表（包括不同 λ 、 K 值时的径流值表），（见表3）。实测与计算径流相关图（见图1）。

4. 汇流计算结果：

本文取 $\lambda = 1100 \text{ 毫米}^2/\text{小时}$ ， $K = 9 \text{ 小时}$ ，的各次洪水，对地表径流仍以四角三角形单波线，对壤中径流按线性水库出流进行汇流计算，以便对产流计算的拟合情况进一步分析（见图2）。

5. 入渗率与蓄水量关系曲线 $I \sim S$ ，及相对不透水层处渗透率曲线 $D \sim S$ 等（见图3、4、5、6）。其中图3为入渗率与蓄水量关系曲线，图4-3为 $D \sim S$ 曲线。图4-1、4-2分别为壤中径流及地表径流的产流面积分配曲线，图5为考虑流域面积分配曲线后的相对不透水层处流域平均渗透率 D' 与蓄水量的关系曲线。图6为入渗曲线及渗透率曲线。

6. 实例：见表4、5。

三. 成果讨论：

1. 由径流成果表可见，总径流拟合较好，而地表径流拟合较差。

2. 对照洪水过程线发现：各层径流量拟合很好时过程线拟合不一定好，而各层径流量拟合很差时过程线拟合却不一定差。例如 770506 次洪水，各层径流量拟合还好，但过程线相差较大，而 770911、770915、770925 次洪水尽管其地表径流量拟合很差，但过程线拟合尚好。

产生上述情况的原因，是由于实际的产流过程是与汇流过程交错进行，一部分地表水可能在汇流途中流入地下，而一部分壤中径流则可能流出地面。因此，实测的地表径流中也包含一部分壤中径流，而实测的壤中径流中也包含一部分地表径流。

而这两种地表径流和壤中径流的产汇流特性与前述的地表径流与壤中径流的产汇流特性是不同的。因此进一步研究同时考虑产、汇流的方法是今后需要解决的问题。

3. 模型计算简化的条件:

本模型产流计算的主要参数是 α 、 K 。其中 K 值由单位线退水曲线分析计算而得，相应的 α 值也可根据本模型计算公式确定，因此，对于一般无分层测流资料的流域，本模型也能使用。

此外，根据 α 、 K 值的大小还可对本模型的计算进行简化：若 K 值很大，则 $D = \frac{1}{K}$ 接近于0，仅有地表径流，无须分层计算，我国北方一些干旱地区即属此例。我国南方湿润地区 K 、 α 值均比较小，相当于 $P/\alpha: 1:P$ 入渗理论中的 α 值较大的情况*，可简化为蓄满产流计算，通过一些变换则可得出当 $K/\alpha \leq C$ （常数）时，简化为蓄满产流计算。对于介于上述二种特例之间的地区，则不能简化模型。由于本文仅对高塘溪部分资料进行了计算，尚不能给出简化模型时定量的 α 、 K 值标准。高塘溪的总 $K = 8100$ ，在该区使用蓄满产流模型（不分层），其总径流计算也能得出满意的结果。

* α 的物理意义及变化范围参阅文献[5]。

表1 用最小二乘法优选K值计算表

R 总次	$R_{1/2} = 1/2$		$R_{1/4} = 1/4$		$R_{1/8} = 1/8$		$R_{1/16} = 1/16$		$R_{1/32} = 1/32$		$R_{1/64} = 1/64$		$R_{1/128} = 1/128$		$R_{1/256} = 1/256$		$R_{1/512} = 1/512$		$R_{1/1024} = 1/1024$		$R_{1/2048} = 1/2048$		$R_{1/4096} = 1/4096$		$R_{1/8192} = 1/8192$		$R_{1/16384} = 1/16384$		$R_{1/32768} = 1/32768$		$R_{1/65536} = 1/65536$		$R_{1/131072} = 1/131072$		$R_{1/262144} = 1/262144$		$R_{1/524288} = 1/524288$		$R_{1/1048576} = 1/1048576$		$R_{1/2097152} = 1/2097152$		$R_{1/4194304} = 1/4194304$		$R_{1/8388608} = 1/8388608$		$R_{1/16777216} = 1/16777216$		$R_{1/33554432} = 1/33554432$		$R_{1/67108864} = 1/67108864$		$R_{1/134217728} = 1/134217728$		$R_{1/268435456} = 1/268435456$		$R_{1/536870912} = 1/536870912$		$R_{1/1073741824} = 1/1073741824$		$R_{1/2147483648} = 1/2147483648$		$R_{1/4294967296} = 1/4294967296$		$R_{1/8589934592} = 1/8589934592$		$R_{1/17179869184} = 1/17179869184$		$R_{1/34359738368} = 1/34359738368$		$R_{1/68719476736} = 1/68719476736$		$R_{1/137438953472} = 1/137438953472$		$R_{1/274877906944} = 1/274877906944$		$R_{1/549755813888} = 1/549755813888$		$R_{1/1099511627776} = 1/1099511627776$		$R_{1/2199023255552} = 1/2199023255552$		$R_{1/4398046511104} = 1/4398046511104$		$R_{1/8796093022208} = 1/8796093022208$		$R_{1/17592186044416} = 1/17592186044416$		$R_{1/35184372088832} = 1/35184372088832$		$R_{1/70368744177664} = 1/70368744177664$		$R_{1/140737488355328} = 1/140737488355328$		$R_{1/281474976710656} = 1/281474976710656$		$R_{1/562949953421312} = 1/562949953421312$		$R_{1/1125899906842624} = 1/1125899906842624$		$R_{1/2251799813685248} = 1/2251799813685248$		$R_{1/4503599627370496} = 1/4503599627370496$		$R_{1/9007199254740992} = 1/9007199254740992$		$R_{1/18014398509481984} = 1/18014398509481984$		$R_{1/36028797018963968} = 1/36028797018963968$		$R_{1/72057594037927936} = 1/72057594037927936$		$R_{1/144115188075855872} = 1/144115188075855872$		$R_{1/288230376151711744} = 1/288230376151711744$		$R_{1/576460752303423488} = 1/576460752303423488$		$R_{1/1152921504606846976} = 1/1152921504606846976$		$R_{1/2305843009213693952} = 1/2305843009213693952$		$R_{1/4611686018427387904} = 1/4611686018427387904$		$R_{1/9223372036854775808} = 1/9223372036854775808$		$R_{1/18446744073709551616} = 1/18446744073709551616$		$R_{1/36893488147419103232} = 1/36893488147419103232$		$R_{1/73786976294838206464} = 1/73786976294838206464$		$R_{1/147573952589676412928} = 1/147573952589676412928$		$R_{1/295147905179352825856} = 1/295147905179352825856$		$R_{1/590295810358705651712} = 1/590295810358705651712$		$R_{1/1180591620717411303424} = 1/1180591620717411303424$		$R_{1/2361183241434822606848} = 1/2361183241434822606848$		$R_{1/4722366482869645213696} = 1/4722366482869645213696$		$R_{1/9444732965739290427392} = 1/9444732965739290427392$		$R_{1/18889465931478580854784} = 1/18889465931478580854784$		$R_{1/37778931862957161709568} = 1/37778931862957161709568$		$R_{1/75557863725914323419136} = 1/75557863725914323419136$		$R_{1/151115727451828646838272} = 1/151115727451828646838272$		$R_{1/302231454903657293676544} = 1/302231454903657293676544$		$R_{1/604462909807314587353088} = 1/604462909807314587353088$		$R_{1/1208925819614629174706176} = 1/1208925819614629174706176$		$R_{1/2417851639229258349412352} = 1/2417851639229258349412352$		$R_{1/4835703278458516698824704} = 1/4835703278458516698824704$		$R_{1/9671406556917033397649408} = 1/9671406556917033397649408$		$R_{1/19342813113834066795298816} = 1/19342813113834066795298816$		$R_{1/38685626227668133590597632} = 1/38685626227668133590597632$		$R_{1/77371252455336267181195264} = 1/77371252455336267181195264$		$R_{1/154742504910672534362390528} = 1/154742504910672534362390528$		$R_{1/309485009821345068724781056} = 1/309485009821345068724781056$		$R_{1/618970019642690137449562112} = 1/618970019642690137449562112$		$R_{1/1237940039285380274899124224} = 1/1237940039285380274899124224$		$R_{1/2475880078570760549798248448} = 1/2475880078570760549798248448$		$R_{1/4951760157141521099596496896} = 1/4951760157141521099596496896$		$R_{1/9903520314283042199192993792} = 1/9903520314283042199192993792$		$R_{1/19807040628566084398385987584} = 1/19807040628566084398385987584$		$R_{1/39614081257132168796771975168} = 1/39614081257132168796771975168$		$R_{1/79228162514264337593543950336} = 1/79228162514264337593543950336$		$R_{1/158456325028528675187087900672} = 1/158456325028528675187087900672$		$R_{1/316912650057057350374175801344} = 1/316912650057057350374175801344$		$R_{1/633825300114114700748351602688} = 1/633825300114114700748351602688$		$R_{1/1267650600228229401496703205376} = 1/1267650600228229401496703205376$		$R_{1/2535301200456458802993406410752} = 1/2535301200456458802993406410752$		$R_{1/5070602400912917605986812821504} = 1/5070602400912917605986812821504$		$R_{1/10141204801825835211973625643008} = 1/10141204801825835211973625643008$		$R_{1/20282409603651670423947251286016} = 1/20282409603651670423947251286016$		$R_{1/40564819207303340847894502572032} = 1/40564819207303340847894502572032$		$R_{1/81129638414606681695789005144064} = 1/81129638414606681695789005144064$		$R_{1/162259276829213363391578010288128} = 1/162259276829213363391578010288128$		$R_{1/324518553658426726783156020576256} = 1/324518553658426726783156020576256$		$R_{1/649037107316853453566312041152512} = 1/649037107316853453566312041152512$		$R_{1/1298074214633706907132624082305024} = 1/1298074214633706907132624082305024$		$R_{1/2596148429267413814265248164610048} = 1/2596148429267413814265248164610048$		$R_{1/5192296858534827628530496329220096} = 1/5192296858534827628530496329220096$		$R_{1/10384593717069655257060992658440192} = 1/10384593717069655257060992658440192$		$R_{1/20769187434139310514121985316880384} = 1/20769187434139310514121985316880384$		$R_{1/41538374868278621028243970633760768} = 1/41538374868278621028243970633760768$		$R_{1/83076749736557242056487941267521536} = 1/83076749736557242056487941267521536$		$R_{1/166153499473114484112975882535043072} = 1/166153499473114484112975882535043072$		$R_{1/332306998946228968225951765070086144} = 1/332306998946228968225951765070086144$		$R_{1/664613997892457936451903530140172288} = 1/664613997892457936451903530140172288$		$R_{1/1329227995784915872903807060280344576} = 1/1329227995784915872903807060280344576$		$R_{1/2658455991569831745807614120560689152} = 1/2658455991569831745807614120560689152$		$R_{1/5316911983139663491615228241121378304} = 1/5316911983139663491615228241121378304$		$R_{1/10633823966279326983230456482242756608} = 1/10633823966279326983230456482242756608$		$R_{1/21267647932558653966460912964485513216} = 1/21267647932558653966460912964485513216$		$R_{1/42535295865117307932921825928971026432} = 1/42535295865117307932921825928971026432$		$R_{1/85070591730234615865843651857942052864} = 1/85070591730234615865843651857942052864$		$R_{1/170141183460469231731687303715884105728} = 1/170141183460469231731687303715884105728$		$R_{1/340282366920938463463374607431768211456} = 1/340282366920938463463374607431768211456$		$R_{1/680564733841876926926749214863536422912} = 1/680564733841876926926749214863536422912$		$R_{1/1361129467683753853853498429727072845824} = 1/1361129467683753853853498429727072845824$		$R_{1/2722258935367507707706996859454145691648} = 1/2722258935367507707706996859454145691648$		$R_{1/5444517870735015415413993718908291383296} = 1/5444517870735015415413993718908291383296$		$R_{1/10889035741470030830827987437816582766592} = 1/10889035741470030830827987437816582766592$		$R_{1/21778071482940061661655974875633165533184} = 1/21778071482940061661655974875633165533184$		$R_{1/43556142965880123323311949751266331066368} = 1/43556142965880123323311949751266331066368$		$R_{1/87112285931760246646623899502532662132736} = 1/87112285931760246646623899502532662132736$		$R_{1/174224571863520493293247799005065324265472} = 1/174224571863520493293247799005065324265472$		$R_{1/348449143727040986586495598010130648530944} = 1/348449143727040986586495598010130648530944$		$R_{1/696898287454081973172991196020261297061888} = 1/696898287454081973172991196020261297061888$		$R_{1/1393796574908163946345982392040522594123776} = 1/1393796574908163946345982392040522594123776$		$R_{1/2787593149816327892691964784081045188247552} = 1/2787593149816327892691964784081045188247552$		$R_{1/5575186299632655785383929568162090376495104} = 1/5575186299632655785383929568162090376495104$		$R_{1/11150372599265311570767859136324180752990208} = 1/11150372599265311570767859136324180752990208$		$R_{1/22300745198530623141535718272648361505980416} = 1/22300745198530623141535718272648361505980416$		$R_{1/44601490397061246283071436545296723011960832} = 1/44601490397061246283071436545296723011960832$		$R_{1/89202980794122492566142873090593446023921664} = 1/89202980794122492566142873090593446023921664$		$R_{1/178405961588244985132285746181186892047843328} = 1/178405961588244985132285746181186892047843328$		$R_{1/356811923176489970264571492362373784095686656} = 1/356811923176489970264571492362373784095686656$		$R_{1/713623846352979940529142984724747568191373312} = 1/713623846352979940529142984724747568191373312$		$R_{1/1427247692705959881058285969449495136382746624} = 1/1427247692705959881058285969449495136382746624$		$R_{1/2854495385411919762116571938898990272} = 1/2854495385411919762116571938898990272$	
------	-----------------	--	-----------------	--	-----------------	--	-------------------	--	-------------------	--	-------------------	--	---------------------	--	---------------------	--	---------------------	--	-----------------------	--	-----------------------	--	-----------------------	--	-----------------------	--	-------------------------	--	-------------------------	--	-------------------------	--	---------------------------	--	---------------------------	--	---------------------------	--	-----------------------------	--	-----------------------------	--	-----------------------------	--	-----------------------------	--	-------------------------------	--	-------------------------------	--	-------------------------------	--	---------------------------------	--	---------------------------------	--	---------------------------------	--	-----------------------------------	--	-----------------------------------	--	-----------------------------------	--	-----------------------------------	--	-------------------------------------	--	-------------------------------------	--	-------------------------------------	--	---------------------------------------	--	---------------------------------------	--	---------------------------------------	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--	---	--

表2 不同 K 值情况下各次洪水 S_0 值

洪水 Q_0	$K=10$ $K=7$	$K=100$ $K=9$	$K=100$ $K=11$	$K=1300$ $K=9$	$K=900$ $K=9$
770506	108.7	108.7	108.7	108.7	108.7
770704	105.6	105.7	105.8	105.8	105.7
770715	82.0	82.1	82.3	81.9	82.1
770720	96.7	96.8	96.8	96.8	96.8
770806	65.3	65.4	65.4	65.4	65.4
770829	82.2	82.2	82.1	82.2	82.1
770901	105.6	105.8	105.8	105.8	105.8
770911	83.9	83.3	83.5	83.3	83.1
770915	108.7	108.7	108.7	108.7	108.7
770925	91.2	91.3	91.7	91.3	91.3

改变第一次 S_0 值后各次洪水 S_0 计算值 ($K=100, K=9$)

洪水 Q_0	$S_0=108.7$	$S_0=91.9$	$S_0=89.1$	$S_0=108.3$	
770506	108.7	96.9	89.1	108.3	
770704	105.7	105.8	105.8	105.8	
770715	82.1	81.9	81.9	81.9	
770720	96.8	96.8	96.8	96.8	
770806	65.4	65.4	65.4	65.4	
770829	82.2	82.2	82.2	82.2	
770901	105.8	105.8	105.8	105.8	
770911	83.3	83.3	83.3	83.3	
770915	108.7	108.7	108.7	108.7	
770925	91.3	91.3	91.3	91.3	

表3 实测与计算还流成果比较表

洪水	R 误差	R 总计	R 下流	R 不计	R 误差	R 总计	P (误差)
770506	41.6	42.2	32.3	37.8	8.7	44	82.5
770704	20.4	22.2	19.8	19.6	2.6	26	24.5
770715	32.9	31.1	29.0	23.2	3.9	29	59.5
770720	81.8	78.6	66.6	62.6	14.8	12.0	94.5
770806	1.0	0.9	0.6	0.5	0.4	0.4	20.4
770829	2.6	2.8	2.6	1.9	0.6	0.9	25.4
770901	132.7	135.5	81.7	86.4	54.6	55.5	141.6
770911	147.0	149.3	56.1	62.0	6.9	61.3	151.6
770915	115.8	115.7	61.8	74.3	55.0	61.4	115.8
770925	144.5	142.2	110.2	128.4	22.3	2.8	141.8

 $K=900$ 毫米/小时 $K=9$ 小时

单位均以 mm 计

表3

不同 R 、 K 值计标成果表 $R_{城} = 0.95D$

洪号	$R_{总} 实$	$R_{总} \begin{smallmatrix} R=1100 \\ K=7 \end{smallmatrix}$	$R_{总} \begin{smallmatrix} R=1100 \\ K=9 \end{smallmatrix}$	$R_{总} \begin{smallmatrix} R=1100 \\ K=11 \end{smallmatrix}$	$R_{总} \begin{smallmatrix} R=1300 \\ K=7 \end{smallmatrix}$	$R_{总} \begin{smallmatrix} R=900 \\ K=9 \end{smallmatrix}$	P (次降雨量)
770506	41.0	42.7	42.4	41.7	42.1	42.2	42.5
770704	22.4	22.6	22.3	21.9	22.4	22.2	24.8
770715	22.9	31.5	31.1	30.7	30.8	31.1	57.5
770720	20.8	78.6	78.5	77.3	78.7	78.6	94.5
770806	1.0	0.9	0.8	0.7	0.8	0.9	21.4
770829	2.6	2.7	2.7	2.7	2.7	2.8	25.4
770901	137.7	135.3	135.1	134.1	134.8	135.5	141.6
770911	147.0	150.8	151.5	151.6	150.9	149.3	180.6
770915	115.8	114.6	115.8	115.8	115.5	115.7	115.8
770925	144.5	143.4	142.5	143.1	142.4	142.2	161.8
	$R_{总} 实$	$R_{总} \begin{smallmatrix} R=1100 \\ K=7 \end{smallmatrix}$	$R_{总} \begin{smallmatrix} R=1100 \\ K=9 \end{smallmatrix}$	$R_{总} \begin{smallmatrix} R=1100 \\ K=11 \end{smallmatrix}$	$R_{总} \begin{smallmatrix} R=1300 \\ K=7 \end{smallmatrix}$	$R_{总} \begin{smallmatrix} R=900 \\ K=9 \end{smallmatrix}$	
770506	32.3	37.8	37.7	38.4	40.0	37.8	
770704	19.8	20.1	18.9	19.7	20.2	19.6	
770715	29.0	24.6	24.0	23.6	24.3	23.2	
770720	62.0	64.2	63.3	63.1	64.7	62.6	
770806	0.6	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5	
770829	2.0	1.8	1.9	1.9	1.9	1.9	
770901	81.7	85.6	83.2	81.6	87.4	80.0	
770911	86.1	117.9	116.2	115.2	122.3	108.0	
770915	60.8	81.2	77.3	76.4	80.0	74.3	
770925	110.2	141.9	140.6	140.7	141.1	139.4	
	$R_{总} 实$	$R_{总} \begin{smallmatrix} R=1100 \\ K=7 \end{smallmatrix}$	$R_{总} \begin{smallmatrix} R=1100 \\ K=9 \end{smallmatrix}$	$R_{总} \begin{smallmatrix} R=1100 \\ K=11 \end{smallmatrix}$	$R_{总} \begin{smallmatrix} R=1300 \\ K=7 \end{smallmatrix}$	$R_{总} \begin{smallmatrix} R=900 \\ K=9 \end{smallmatrix}$	
770506	5.7	2.9	4.7	3.3	2.1	4.4	
770704	2.6	2.5	3.4	2.2	2.2	2.6	
770715	3.9	6.9	7.1	7.1	6.5	7.9	
770720	14.8	14.4	15.2	14.2	14.0	16.0	
770806	0.4	0.4	0.2	0.2	0.3	0.4	
770829	0.6	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	
770901	56.0	49.7	51.9	52.5	47.4	55.5	
770911	60.9	32.9	35.3	36.4	28.6	41.3	
770915	55.0	33.4	38.5	39.4	25.5	41.4	
770925	34.3	1.5	1.9	2.4	1.3	2.8	
透流深的单位均为 mm							

表4 770720 洪水的 S_0 计标表

t	P	S_0	$\Sigma D'$	ΣE	
日	mm	mm	mm	mm	
16 (18)	1.7	106.9	2.8	1.5	
17	3.5	104.3	2.0	2.4	
18	1.6	103.4	1.8	1.5	
19		101.7	1.4	2.6	
20 (7)		97.7	0.4	0.5	
		96.8			

表5 770720 洪水的产流计标表

t	I	S	I'	D'	E	i	$1(-I') \frac{P_0}{F} = 1-I$
日时分	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
20 15 15		96.8			0.08		
30	0.3	96.72	2.8	0.02		0.3	
16 00	1.5	97.00	5.6	0.02	0.08	1.5	
30	1.1	98.48	5.6	0.03		1.1	
45	4.7	99.55	2.8	0.02		4.7	0.2
17 00	13.7	104.23	2.6	0.02	0.08	14.8	1.5
15	6.6	117.83	2.3	0.35		7.6	1.0
18 00	0.1	124.08	2.2	1.58	0.08	0.1	
30	0.1	122.52	4.5	0.97		0.1	
19 00	4.4	121.65	4.5	0.92	0.08	4.4	
30	3.5	125.05	4.4	1.11		3.5	
20 00	3.6	127.44	4.3	1.24	0.08	3.6	