分层超渗产流模型探讨

李蝶娟　　金管生

水利部南京水文研究所

一九八一年二月

分层超渗产流模型探讨

1979年11月洪水组关《流域产流模型的分析研究》一文中用动力水文学观点分析了单元和流域的产流现象，文中通过理论研究与实际资料分析，得出降雨强度大于入渗强度，是产流的先决条件。超渗产流是普遍规律，无论干旱地区或湿润地区均不例外。

本文在这一工作的基础上结合我国的实际情况，提出如下分级超渗多水源产流模型，供讨论研究。

一、模型的结构：

(一) 土壤入渗曲线：

本模型以采用的入渗模型霍顿（Horton）入渗曲线（图1）作为概化的流域入渗曲线。

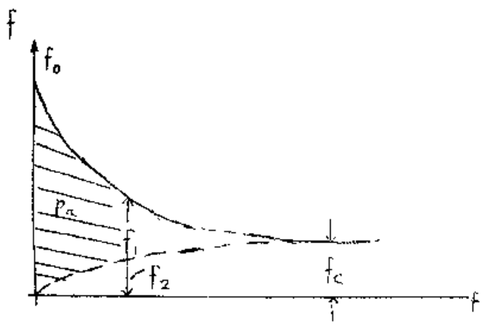


图 1

其方程为：

$$f=(f_0-f_c)e^{-Kt}+f_c \qquad (1)$$

上式还可以改写为：

$$f=f_0e^{-Kt}+f_c(1-e^{-Kt}) = f_1+f_2 \qquad (1-1)$$

式中 f_1 为降雨渗入土壤增加土壤含水量的部分，当土壤含水量达到土层的最大容量 I_m 时，f_1 趋近零；f_2 为降雨渗入土壤由土层排出的部分，虚线即为土层排水率曲线，当土壤含水量为零时，排水率 f_2 为零，随着土壤含水量增加而增加，并趋近於 f_c；P_a 为流域土壤含水量。

流域土壤最大含水量 [illegible] 量 P_a 可分别由下式求得：

$$I_m=\int_0^\infty f_0e^{-Kt}dt \; [illegible] \; /K \qquad (2)$$

$$P_a = \int_0^t f_0 e^{-Kt} dt = f_0/_K (1-e^{-Kt}) = I_m (1-e^{-Kt}) \quad (3)$$

式中f_0为土壤干燥时的入渗强度；K为入渗率、递减系数。

当流域土壤含水量为P_a时，时段Δt内的流域平均入渗率和排水率分别为：

$$\bar{f} = \frac{1}{\Delta t}\int_t^{t+\Delta t} [(f_0 - f_c)e^{-Kt} + f_c] dt \quad (4)$$

$$\bar{i}_{下} = \frac{1}{\Delta t}\int_t^{t+\Delta t} f_c (1 - e^{-Kt}) dt \quad (5)$$

积分上式并以I_m.P_a表示，则有：

$$\bar{f} = \frac{1}{\Delta t}(I_m - P_a)(1-e^{-K\Delta t}) + f_c[1 - \frac{I_m - P_a}{\Delta t \cdot K \cdot I_m}(1-e^{-K\Delta t})] \quad (4-1)$$

$$\bar{i}_{下} = f_c - \frac{f_c}{\Delta t K} e^{-Kt}(1-e^{-K\Delta t}) \quad (5-1)$$

（二）前期土壤含水量P_a计算

土壤含水量的确定是产流计算中的一个重要环节。由于目前不能通过量测的手段取得大量的资料，而需借助于有限的土壤含水量资料，探求其增长和消退规律，再推算土壤含水量的变化过程。

为此我们利用邹伙试验场的负压计观测资料作一些粗浅的分析：

1、土壤含水量的增长：

降雨入渗引起土壤含水量的增长，在一个计算时段，降雨入渗量由下式算得：

$$\Delta P_a = P - R - E - 填洼 - 植物截留 \quad (6)$$

略去填洼和植物截留有：

$$\Delta P_a = P - R - E \quad (6-1)$$

式中　　ΔP_a —— 为计算时段的入渗量；

P —— 为日降雨量；

E —— 为日蒸发量，利用 E_{601} 蒸发皿实测资料计算求得；

R —— 为相应于 P 的产流量，借助于 $P_a \sim \alpha$（径流系数）的关系来推算。

2、土层含水量的消退：

土层含水量的消退与土壤蒸发、水份的垂直运动及水气凝结等有关，但主要决定于土壤的蒸发损失。根据资料分析，土壤含水量的消退一般符合如下规律：

$$\rho = \rho_0 e^{-kt} = \rho_0 K^t \qquad (7)$$

式中：　ρ —— 时间 t 时的含水量；

ρ_0 —— 时间 $t=0$ 时的含水量；

k —— 随土壤特性、含水量大小及气候条件而变的近似常数；

$K = e^{-k}$ —— 日消退系数；

t —— 天数。

我们将地表至入渗锋面之间的土层（0～40公分）分为两层，上层为0～30公分，下层为30～40公分，用汛水期上层平均的土壤含水率资料进行分析，可以得到如下日消退系数：

表 1

层次 \ 日消退系数 \ 含水率	$\theta > 24\%$	$24\% > \theta > 21\%$	$\theta < 21\%$
上层	0.81	0.95	0.97
下层	0.89	0.98	0.995
平均	0.87	0.95	0.98

从表中可以看出，在同样含水率情况下上层K值小于下层K值，即上层的消退速度大于下层的消退速度；在同一土层，土壤含水率高的消退速度大于土壤含水率低的消退速度；再有从表中数字对比可见含水量对消退速度的影响大于土层深度的影响。

运用分析成果，我们在计算土壤含水量时考虑含水量大小对消退的影响。为计算方便先按整层计算土壤含水量Pa，然后利用图2土壤平均含水率与上下层土壤含水量的经验关系将整层土壤含水量分成上、下两层的含水量Pa上，Pa下。根据Pa上和Pa下进行逐时段产流计算。

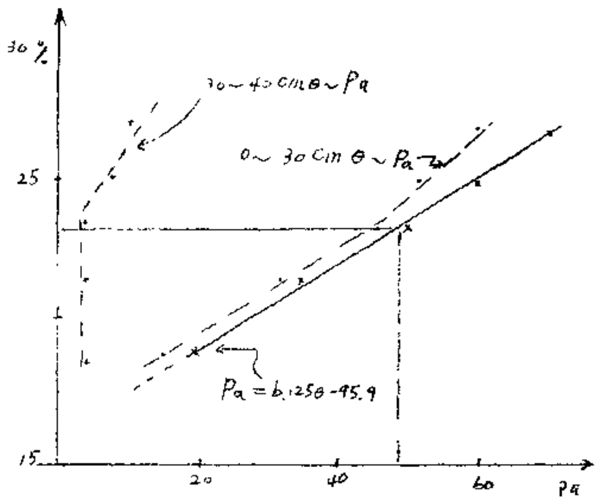


图2

3. 土壤含水量Pa计算：

土壤含水量Pa计算，每年从四或五月间久旱无雨土壤干旱或久雨之后土壤湿润的情况开始计算，初始值选为零或者Im.

① 有雨时，当$(P-P\cdot\alpha)\geq E_m$则按蒸发能力扣损。其中α为径流系数，根据$Pa\sim\alpha$关系求得。

$$Pa_{t+1} = Pa_t + [(P-P\alpha)-E_m] \qquad (8)$$

E_m为蒸发能力用E-601蒸发皿实测蒸发值代替。

当$(P-P\cdot\alpha)<E_m$则

$$Pa_{t+1} = Pa_t + (P-P\cdot\alpha) - E_M\frac{Pa_t}{Im} \qquad (9)$$

(2) 无雨时，土壤含水量为消退阶段，根据土壤含水量资料求得 $P_a > 50$ mm时，日消退系数K为0.87，当 $P_a < 50$ mm 时日消退系数K取0.96。

(三) 土壤分层和分层水流：

本模型是确定性的集总输入和集总参数型的模型。模型将土层分成上、下两层（图3）并分别用 $I_{m上}$ 和 $I_{m下}$ 表示上、下两层土壤最大含水量，以 $P_{a上}$ 和 $P_{a下}$ 表示任一时刻上、下两层的土壤含水量。对应于模型的二个土层，相应产生三种水流，地表迳流、上层壤中流和下层壤中流。地表迳流R表为降水强度超过上层土壤入渗率的部分；上层壤中流 $R_{壤_1}$ 为上层土壤对下层土壤补给率（即上层土壤排水率）超过下层土壤入渗率的部分；下层壤中流 $R_{壤_2}$ 为下层土壤排水率的一部分。

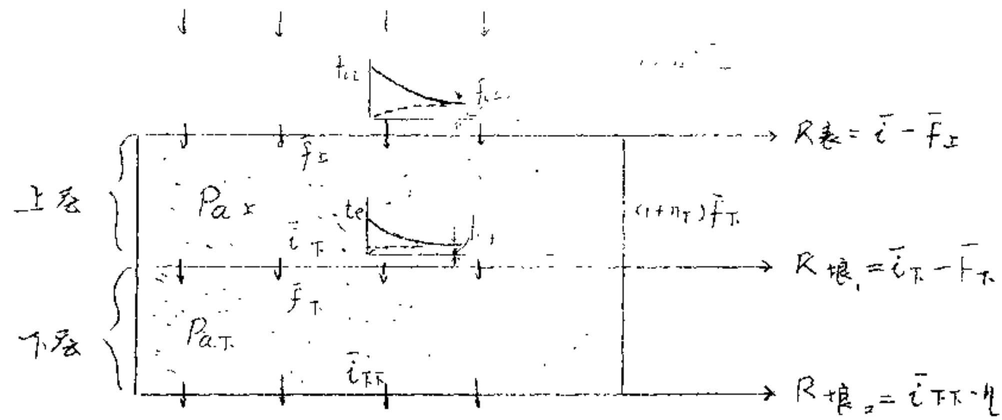


图 3

图中：$\bar{i}$　　时段平均降雨强度；

$\bar{i}_{下}$　　下层时段平均补给率（或上层时段平均排水率）；

$\bar{i}_{下下}$　　深层时段平均补给率（或下层时段平均排水率）；

$\bar{f}_{上}$　　上层时段平均入渗率；

$\bar{f}_{下}$　　下层时段平均入渗率；

$f_{0上}$、$f_{c上}$　　上层最大入渗率和稳定入渗率；

$f_{0下}$ $f_{c下}$　　下层最大入渗率和稳定入渗率；

η　　下层时段排水量的产流系数。

(四) 流域入渗分配：

入渗能力在流域各点是不相同的，为了表达入渗能力流域分配的不均匀性，模型中选用n次抛物线并按全流域分配表达入渗能力的流域分配情况（n次抛物线部分面积分配或其它形式的分配类同）。其公式为：

$$A_i/A_0 = 1-[1-\frac{f_i}{(1+n)\bar{f}}]^n \quad (10$$

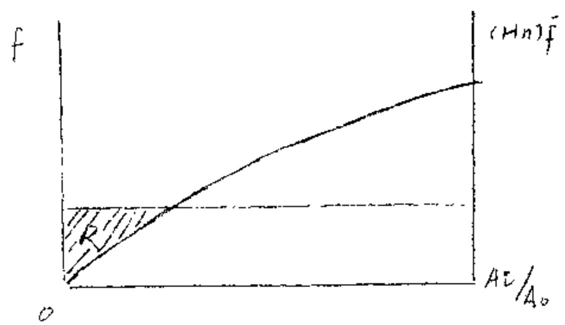


图 4

示如（图4）式中 A_i 为产流面积；A_0 为流域面积；f_i 为对应于 A_i 的时段平均入渗率，$\bar{f}$ 为流域时段平均入渗率；n为抛物线的指数。

(五) 产流量计算：

1、地表径流量R表计算：

参照式(1)上层的入渗曲线公式为：

$$f_{上} = (f_{0上} - f_{c上})e^{-K_{上}t} + f_{c上} \quad (11)$$

当上层土壤含水量为 $P_{a上}$ 时，仿式（4-1）可得时段 Δt 内的平均入渗量为：

$$\bar{f}_{上}\cdot\Delta t = (I_{m上} - P_{a上})(1-e^{-K_{上}\Delta t}) + f_{c上}[\Delta t - \frac{I_{m上}-P_{a上}}{K_{上} I_{m上}}(1-e^{-K_{上}\Delta t})] \quad (11-1)$$

流域上各入渗能力分配情况由式(6)有

$$A_i/A_0 = 1-[1-\frac{\Delta t \bar f_x}{(1+n_x)\Delta t \bar f_x}]^{n_x} \quad (12)$$

由$\bar f_x \Delta t$和时段Δt内的降雨量$\bar i \Delta t$用下式计算地表径流量$R_{表}$：

$$R_{表} = \bar i\Delta t - \bar f_x \Delta t[1-(1-\frac{\bar i\Delta t}{(1+n_x)\Delta t\cdot \bar f_x})^{1+n_x}]^{*} \quad (13)$$

当$\bar f_x(1+n_x)\le \bar i$，即充分供水时，下一个时段初的上层土壤含水量$P_{ax}(t+\Delta t)$由式(3)可得

$$P_{ax}(t+\Delta t) = I_{mx}[1-e^{-K_x(t+\Delta t)}] \quad (14)$$

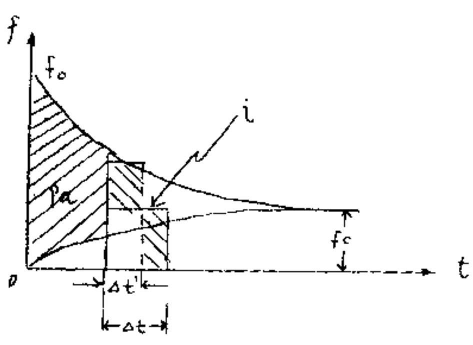
当上层土壤含水量达到I_{mx}时，则有：

$$R_{表} = \bar i\Delta t - f_{cx}\Delta t \quad (13\text{-}1)$$

相应

$$P_{ax}(t+\Delta t) = I_{mx} \quad (14\text{-}1)$$

当$\bar f_x(1+n_x) > \bar i$，即非充分供水时，流域内部分面积上的降雨不能满足入渗如图5所示，流域的实际入渗量为：



$\bar i\Delta t - R_{表}$，对充分供水时的入渗量 $\Delta P_{ax} = I_{mx}(1-e^{-K_x(t+\Delta t)}) - I_{mx}(1-e^{-K_x t})$。为计算下一时段初的土壤含水量需按实际入渗量反求计算时段$\Delta t'$，则：

图 5

$$\bar i\Delta t - R_{表} = (I_{mx}-P_{ax})(1-e^{-K_x\Delta t'}) + f_{cx}[\Delta t' - \frac{I_{mx}-P_{ax}}{K_x I_{mx}}(1-e^{-K_x\Delta t'})] \quad (15)$$

由于方程为隐函数，$\Delta t'$不能直接求解，需试算求得$\Delta t'$。再由试算

* 推求详见参考文献 1

求得的$\Delta t'$计标下一個时段初的上层土壤含水量

$$P_{a上}(t+\Delta t')=I_{m上}[1-e^{-K_上(t+\Delta t')}] \quad (14-2)$$

2、上层壤中流$R_{壤_1}$计标：

上层土壤向下层土壤的时段平均补给率（即上层土壤的排水率）由式(5-1)得：

当$\bar{f}_上(1+n_上)\le\bar{i}$时

$$\bar{i}_下=f_{c上}-\frac{f_{c上}}{\Delta t\,K_上}e^{-K_上 t}(1-e^{-K_上\Delta t}) \quad (16)$$

当$\bar{f}_上(1+n_上)>\bar{i}$时

$$\bar{i}'_下=f_{c上}-\frac{f_{c上}}{\Delta t' K_上}e^{-K_上 t}(1-e^{-K_上\Delta t'}) \quad (16-1)$$

当上层土壤含水量达到$I_{m上}$时，则有

$$\bar{i}_下=f_{c上} \quad (16-2)$$

参照(1)式，下层入渗曲线为：

$$f_下=(f_{o下}-f_{c下})e^{-K_下 t}+f_{c下} \quad (17)$$

当下层土壤含水量为$P_{a下}$时，Δt时段内平均入渗量为：

$$\Delta t\bar{f}_下=(I_{m下}-P_{a下})(1-e^{-K_下\Delta t})+f_{c下}[1-\frac{I_{m下}-P_{a下}}{\Delta t\cdot K_下 I_{m下}}(1-e^{-K_下\Delta t})]$$

(17-1)

入渗能力分配情况如下式：

$$A_i/A_o=1-[1-\frac{\Delta t f_下}{(1+n_下)\Delta t\bar{f}_下}]^{n_下} \quad (18)$$

仿式(13)可推得上层壤中流$R_{壤_1}$为：

$$R_{壤_1}=\bar{i}_下\cdot\Delta t-\bar{f}_下\cdot\Delta t\{1-(1-\frac{\bar{i}_下\cdot\Delta t}{(1+n_下)\Delta t\bar{f}_下})^{n_下+1}] \quad (19)$$

当 $\bar{f}_{\text{下}}(1+n_{\text{下}}) \le \bar{i}_{\text{下}}$ 时，下一时段初的下层土壤含水量 $Pa_{\text{下}}(t+\Delta t)$ 类似式(9)有：

$$Pa_{\text{下}}(t+\Delta t) = I_{m\text{下}}[1-e^{-K_{\text{下}}(t+\Delta t)}] \tag{20}$$

当下层土壤含水量达到 $I_{m\text{下}}$ 时则有：

$$R_{\text{壤}_1} = \bar{i}_{\text{下}} \cdot \Delta t - f_{c\text{下}} \cdot \Delta t \tag{19-1}$$

相应

$$Pa_{\text{下}}(t+\Delta t) = I_{m\text{下}} \tag{20-1}$$

当 $\bar{i}_{\text{下}} < \bar{f}_{\text{下}}(1+n_{\text{下}})$ 时，则按实际入渗量反求计算时段 $\Delta t''$，则有：

$$\bar{i}_{\text{下}} \cdot \Delta t - R_{\text{壤}_1} = (I_{m\text{下}} - Pa_{\text{下}})(1-e^{-K_{\text{下}}\Delta t''}) + f_{c\text{下}}[\Delta t'' - \frac{I_{m\text{下}} - Pa_{\text{下}}}{K_{\text{下}} I_{m\text{下}}}(1-e^{-K_{\text{下}}\Delta t''})] \tag{21}$$

由求得的 $\Delta t''$ 计算下一时段初的下层土壤含水量

$$Pa_{\text{下}}(t+\Delta t'') = I_{m\text{下}}[1-e^{-K_{\text{下}}(t+\Delta t'')}] \tag{20-2}$$

3. 下层壤中流计算．已知下层土壤含水量为 $Pa_{\text{下}}$ 时，可求得下层土壤向深层土壤的时段平均补给率为：

当 $\bar{f}_{\text{下}}(1+n_{\text{下}}) \le \bar{i}_{\text{下}}$ 时

$$\bar{i}_{\text{下下}} = f_{c\text{下}} - \frac{f_{c\text{下}}}{\Delta t \cdot K_{\text{下}}} e^{-K_{\text{下}} t}(1-e^{-K_{\text{下}}\Delta t}) \tag{22}$$

当 $\bar{f}_{\text{下}}(1+n_{\text{下}}) > \bar{i}_{\text{下}}$ 时

$$\bar{i}_{\text{下下}}'' = f_{c\text{下}} - \frac{f_{c\text{下}}}{\Delta t'' K_{\text{下}}} e^{-K_{\text{下}} t}(1-e^{-K_{\text{下}}\Delta t''}) \tag{22-1}$$

当下层土壤含水量达到 $I_{m\text{下}}$ 时则

$$\bar{i}_{\text{下下}} = f_{c\text{下}} \tag{22-2}$$

下层壤中流 $R_{\text{壤}_2}$，本模型拟按下式计算：

$$R_{\text{壤}_2} = \eta \bar{i}_{\text{下下}} \cdot \Delta t \tag{23}$$

式中η为下层壤中流占下层土壤排水量的比例系数。

在天然情况下，上述产流情况一般是交替出现的，因此在计算中必须作时段供水强度 $\bar{i}$（$\bar{i}_下$）是否大于时段入渗能力的判断，视不同情况选用不同的计算式（详见框图(六)）计算出逐时段的产流量，再求得供水总量。

二　模型参数的确定

本模型中共有 $I_{m上}$、$I_{m下}$、$K_上$、$K_下$、$f_{c上}$、$f_{c下}$、η 七个参数。其中 $I_{m上}(=f_{o上}/K_上)$、$K_上$、$f_{c上}$ 为流域上层土壤入渗曲线参数；$I_{m下}(=f_{o下}/K_下)$，$K_下$、$f_{c下}$ 为流域下层土壤入渗曲线参数；η 为下层壤中流出流系数。

(一) 模型参数分析：

$I_{m上}$ 和 $I_{m下}$ 分别为影响土层上层和下层的土壤含水量最大可能容量，它们之和即为影响土层含水量的最大可能容量 I_m。

降雨入渗引起土壤含水量变化的土层深度（即影响土层深度）是一个变数，它随雨强大小和雨时长短而变。如果雨强大，雨时短入渗锋面的位置比较浅；反之，雨强小，雨时长则入渗锋面的位置就比较深，因而不同的雨强和雨时具有不同的入渗锋面深度见图(6**)即成负压计场入渗锋面图。但对于这一情况简难加以考虑，在本模型中仅考虑入渗锋面的平均深度，根据祁仪试验区资料分析为40公分左右。

地表到入渗锋面土层最大含水量，亦即为降雨前后土壤含水量的最大变量 $I_m = P_{amax} - P_{amin}$，根据祁仪试验区多年土壤含水量垂线分布资料点绘土壤含水量垂线分布图，并取其内外包线（图7中阴线部分），并由此求得土层的 I_m，为 70^{mm}。地面至地面以下30公分土层含水量变化较大为上层，$I_{m上}$ 为 60^{mm}；地面以下30至40公分之间的土层含水量变化较少为下层，其 $I_{m下}$ 为 10^{mm}

** 见参考文献3。

八、模型计算图

$\bar{i}\cdot\Delta t$

$P_{a上}$

$$\bar{f}_上\cdot\Delta t=(I_{m上}-P_{a上})(1-e^{-K_上\Delta t})+[\Delta t-\frac{I_{m上}-P_{a上}}{K_上 I_{m上}}(1-e^{-K_上\Delta t})]f_{c上}$$

$$R_表=\bar{i}\cdot\Delta t-\bar{f}_上\cdot\Delta t[1-(1-\frac{\bar{i}\cdot\Delta t}{(1+n_上)\bar{f}_上\Delta t})^{n_上+1}];\quad \frac{\bar{i}\cdot\Delta t}{(1+n_上)\bar{f}_上\Delta t}\geq 1 \overset{令}{=} 1$$

$$t=\frac{1}{K_上}\ln(1-\frac{P_{a上}}{I_{m上}})$$

$\bar{i}\cdot\Delta t$ 是否 $\geq(1+n_上)\bar{f}_上\Delta t$

是

$$\bar{i}_下\Delta t=f_{c上}\Delta t-\frac{f_{c上}}{K_上}e^{-K_上 t}(1-e^{-K_上\Delta t})$$

$$P_{a上}(t+\Delta t)=I_{m上}[1-e^{-K_上(t+\Delta t)}]$$

$P_{a下}$

$$\bar{f}_下\Delta t=(I_{m下}-P_{a下})(1-e^{-K_下\Delta t})+[\Delta t-\frac{I_{m下}-P_{a下}}{K_下 I_{m下}}(1-e^{-K_下\Delta t})]f_{c下}$$

$$R_{壤_1}=\bar{i}_下\Delta t-\bar{f}_下\Delta t[1-(1-\frac{\bar{i}_下\Delta t}{(1+n_下)\bar{f}_下\Delta t})^{n_下+1}],\quad \frac{\bar{i}_下\Delta t}{(1+n_下)\bar{f}_下\Delta t}\geq 1 \overset{令}{=} 1$$

$$t_2=-\frac{1}{K_下}\ln(1-\frac{P_{a下}}{I_{m下}})$$

$\bar{i}\cdot\Delta t$ 是否 $\geq(1+n_下)\bar{f}_下\Delta t$

是

$$P_{a下}(t+\Delta t)=I_{m下}[1-e^{-K_下(t+\Delta t)}]$$

$$R_{壤_2}=[f_{c下}\Delta t-\frac{f_{c下}}{K_下}e^{-K_下 t}(1-e^{-K_下\Delta t})]\eta$$

否

$$\bar{i}_下\Delta t-R_{壤_1}=(I_{m下}-P_{a下})(1-e^{-K_下\Delta t''})+[\Delta t''-\frac{I_{m下}-P_{a下}}{K_下 I_{m下}}(1-e^{-K_下\Delta t''})]f_{c下}$$

试求 $\Delta t''$

$$P_{a下}(t+\Delta t'')=I_{m下}[1-e^{-K_下(t+\Delta t'')}]$$

$$R_{壤_2}=[f_{c下}\Delta t''-\frac{f_{c下}}{K_下}e^{-K_下 t}(1-e^{-K_下\Delta t''})]\eta$$

否

$$\bar{i}\cdot\Delta t-R_表=(I_{m上}-P_{a上})(1-e^{-K_上\Delta t'})+[\Delta t'-\frac{I_{m上}-P_{a上}}{K_上 I_{m上}}(1-e^{-K_上\Delta t'})]f_{c上}$$

试求 $\Delta t'$

$$P_{a上}(t+\Delta t')=I_{m上}[1-e^{-K_上(t+\Delta t')}]$$

$$\bar{i}_下\Delta t'=f_{c上}\Delta t'-\frac{f_{c上}}{K_上}e^{-K_上 t}(1-e^{-K_上\Delta t'})$$

$$\bar{f}_下\Delta t'=(I_{m下}-P_{a下})(1-e^{-K_下\Delta t'})+f_{c下}[\Delta t'-\frac{I_{m下}-P_{a下}}{K_下 I_{m下}}(1-e^{-K_下\Delta t'})]$$

$$R_{壤_1}=\bar{i}_下\Delta t'-\bar{f}_下\Delta t'[1-(1-\frac{\bar{i}_下\Delta t'}{(1+n_下)\bar{f}_下\Delta t'})^{n_下+1}];\quad \frac{\bar{i}_下\Delta t'}{(1+n_下)\bar{f}_下\Delta t'}\geq 1 \overset{令}{=} 1$$

$$t_2=-\frac{1}{K_2}\ln(1-\frac{P_{a下}}{I_{m下}})$$

$\bar{i}_下\Delta t$ 是否 $\geq(1+n_下)\bar{f}_下\Delta t$

是

$$P_{a下}(t+\Delta t')=I_{m下}(1-e^{-K_下(t+\Delta t')})$$

$$R_{壤_2}=[f_{c下}\Delta t'-\frac{f_{c下}}{K_下}e^{-K_下 t}(1-e^{-K_下\Delta t'})]\eta$$

否

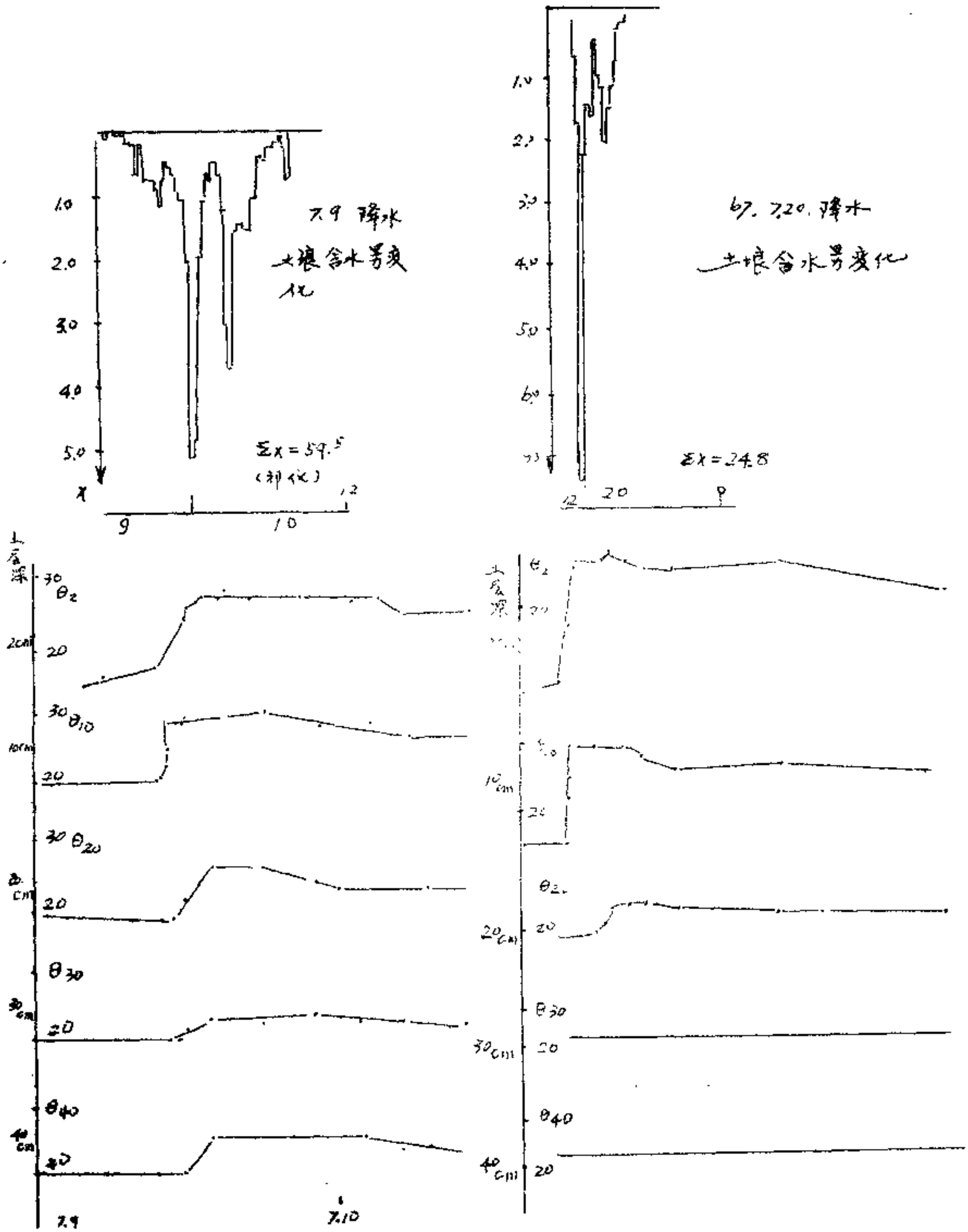
$$\bar{i}_下\Delta t'-R_{壤_1}=(I_{m下}-P_{a下})(1-e^{-K_下\Delta t'''})+f_{c下}[\Delta t'''-\frac{I_{m下}-P_{a下}}{K_下 I_{m下}}(1-e^{-K_下\Delta t'''})]$$

试求 $\Delta t'''$

$$P_{a下}(t+\Delta t''')=I_{m下}(1-e^{-K_下(t+\Delta t''')})$$

$$R_{壤_2}=[f_{c下}\Delta t'''-\frac{f_{c下}}{K_下}e^{-K_下 t}(1-e^{-K_下\Delta t'''})]\eta$$

郝仪负压计 场入渗锋面图



最大、最小土壤含水率垂线分布图

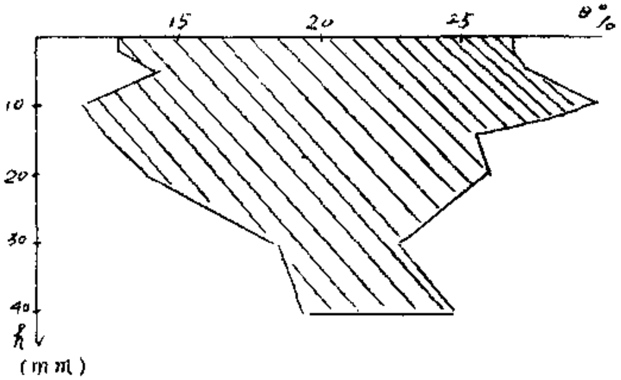


图 7

流域上下层土壤入渗曲线参数$K_上$，$K_下$和稳定入渗率$f_{c上}$，$f_{c下}$根据神农试验区同心环及负压计试验资料确定参数优选范围，K值为0～1，f_c为2～7mm/小时之间，然后由计算机优选确定。

下层壤中流三流参数η由优选确定。

（二）参数优选：

本次参数优选采用手工和计算机相结合的办法来进行的。首先在参数分析的基础上变动其中一个参数，固定其它各参数由计算机进行多次计算试求单参数变动对径流的影响，然后再用类似的办法对其它各个参数进行计算，在此基础上对各参数进行适当的调整和综合，选择若干组较合适的参数。再根据这几组参数由计算机对各次洪水进行计算，并与实测值进行比较，进行参数总体优选。

文中用宋庄站1962、1965年八次洪水资料优选参数，成果如下：

$I_{m上}$ 为60mm，　　$I_{m下}$ 为 10mm

$K_上$ 为1.0，　　$K_下$ 为 0.5

$f_{c上}$ 为4mm/小时　　$f_{c下}$ 为 2mm/小时

η 为0.02。

（三）模型检验

根据宋庄流域1962至1967年五年降水量，流量资料和上述

参数用本模型进行各次洪水产流量计算。计算时段取15分钟，以每次洪水所对应的雨前土壤含水量和逐时段降雨量作为输入按一定程序进行计算，输出R表，R壤和R壤2。25次洪水的计算结果见附表。计算的总R和实测值对比见附表。和图8

从对比结果可以看出在25次洪水中，有五次洪水计算的径流深大于实测值20%以上，偏差较大，经检查，其中四次洪水系属于旱后的首次洪水，由于受流域中塘堰小水库蓄水影响，实测径流深偏小。另一次1963年5月26日洪水，其实测径流深几乎和降雨量相等，实测值可能偏大。从上述定性分析来看，计算径流深尚属合理。在其余的19次洪水中，有17次洪水相对误差小于±20%（小洪水，绝对误差小于±3mm）。此外，我们用计算径流深考虑雨强大小的方法建立以次降雨平均强度为参数的P+Pa与R壤和P+Pa与R表的关系（图9,10），点据分佈规律良好，从图中可以看出在相同的P+Pa值时，雨强越大壤中流越小，地表径流越大；反之雨强越小壤中流越大，地表径流越小

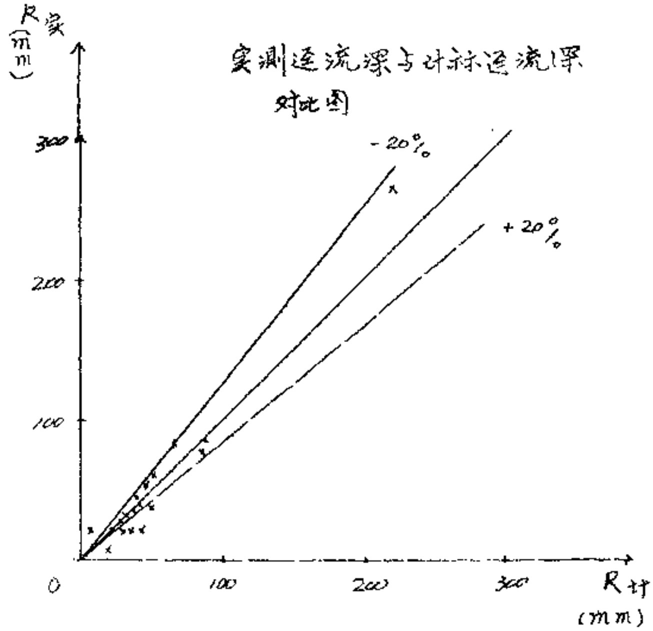


图 8

本模型为分层超渗产流模型。从宋庄流域资料检验可见模型设计是可行的。为了更好地检验模型，我们将选用壤中流较大的流域资料进行产流计算

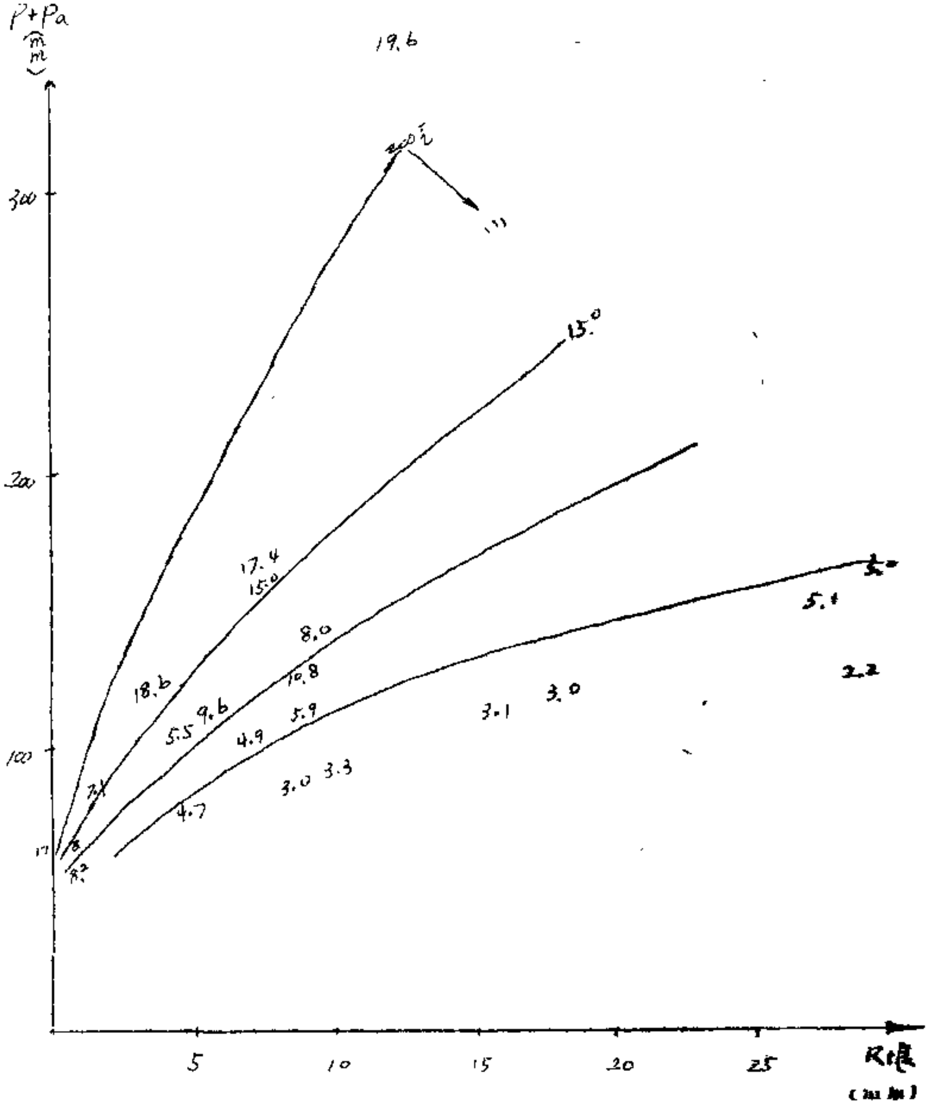

P+Pa
(m)
300
200
100
17
19.6
200 i
15.0
17.4
15.0
8.0
10.8
18.6
5.5 9.6
5.9
4.9
3.0 3.3
4.7
3.1
3.0
5.1
2.2
5
10
15
20
25
R限

图9　P+Pa～i～R限 关系