

黄河沁河暴雨洪水 流域模型的初步探讨

阚贵生 吴学勤

水利部南京水文研究所
水利部黄委会水文局

一九八一年三月

目 录

概述	-----	(1-2)
一、自然地理概况	-----	(2)
二、基本资料	-----	(2-4)
三、流域模型	-----	(4)
(一)、流域产流模型	-----	(4-14)
(二)、流域汇流模型	-----	(14-24)
(三)、河道洪水演算	-----	(25-26)
四、分析讨论	-----	(26)
附录：计算机程序框图	-----	(27-30)
文献	-----	(31)

沁河暴雨洪水流域模型的初步探討

概 述

沁河是黄河三门峡至花园口区间(以下简称三花间)的一条大支流。从以往的水文资料看,这个流域发生大洪水的机会不多,占三花间洪水组成很小。由于流域内自然地理条件复杂和水文气象观测资料较粗,因此以往对该区暴雨洪水形成规律的研究极少。

过去的预报方案,产流采用产流区的暴雨径流关系,汇流考虑暴雨中心不同位置利用几次典型洪水的概化过程线,对一次净雨总号进行分配,预报精度不高。

为了配合花园口洪水预报的需要,同时为了三花间测报自动化的要求,于1980年4月我们和黄委水文局协作研制了沁河暴雨洪水流域模型,并编制了相应的电子计算机程序(TJ-16机)。这项研究工作充分体现了暴雨空间分布不均匀的特性,采用分散式模型。流域以上共有18个单元流域,各单元流域的特征值见表1。

表1 各单元流域特征值

单元流域编号 项 目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
面 积 F_j (km ²)	385	378	327	267	239	466	328	292	610	628	387	289	404	426	357	730	433	327
河道长度 L_j (km)	33	35	35	23	21	28	42	30	35	65	35	40	35	45	38	45	45	27
河道坡度 J_j ‰	8	113	209	5	9	6	7	8	9	7	9	10	13	11	10	12	9	10
单元出口至流域河道距离 L_{cjk} (km)	268	251	251	228	200	200	158	150	68	91	65	65	65	50	27	27	15	0

为了弥补流域内小流域水文资料的不足,还选用了淮河上游一部分资料,作为单元流域汇流参数拟合的依据。模型中产流采用以土壤含水量为主要参数的入渗曲线^[1],对其参数给予

經驗改正。單元匯流採用維性率儀器系統，對其參數進行非維性處理^[2]。各單元流域洪水出口斷面河道洪水滲進採用馬司奈爾負分投連續滲進方法^[3]，對河道匯流速度用經驗的辦法進行了非維性改正。

計算機系統輸入資料是各單元流域的初始前期影響雨勢（或初始土壤含水量），單元流域跨流域和時段平均雨勢。

一、自然地理概況

沁河發源于山西省東南沁源縣境的霍山，海拔1955米，流域以上流域面積7273平方公里，河長297.4公里，流域呈狹長形見圖1。流域以下，過五龍口後在河南沁陽縣境納入最大支流丹河，丹河由北向南流過高平、陵川、晉城等縣與沁河干流匯合轉向正東，搜武涉向南流入黃河。

從地貌上區分，沁河上游屬石山林區，土壤多為紅色夾礫石粘土與紫色風化土，植被良好；中部丘陵區屬石炭系砂岩區，土壤多屬黃土與紅色粘壤土，山脊處多為礫石，植被良好；下游大部屬土石風化區。河口為沖積平原，形成地上河，兩岸靠堤防來水。

沁河的气候屬半濕潤半干旱地區，年雨勢一般在550~700毫米之間，流域中下游稍大。降雨的年内分配大部分集中在汛期6-9月間，約占年雨勢的60-70%，洪水的地区分布主要受暴雨的影响，沁河下游流域、五龍口一帶不僅岩層地下水丰富且为三花間，暴雨中心之一，因此洪水主要来自下游区，并以流域五龍口區間單位面積洪水量最大。

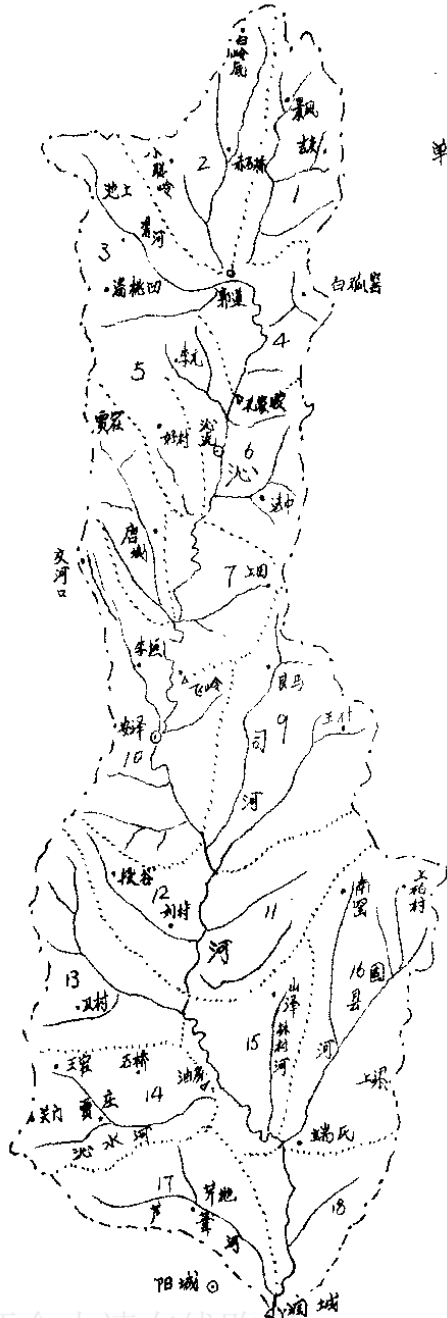
1958年以來，沁河流域修建了大勢的中小水庫，以及其它人类活动影响，对产、汇流都受到很大影响。

二、基本資料

降雨資料，水利部門從五十年代設站起，觀測次數不一，多數站僅觀測日雨勢，時段雨勢的觀測又多是4段制，步數為8段、12段和24段制。1958年流域以上有13個雨勢站，其中只有6個進行時段觀測。60年代，雨勢站略有增加，1965

图 1
沁河流域以上流域
单元面积划分示意图

1: 1000000



年有 23 个站，其中一个自记雨量站。站网密度为 320 平方公里一个站。到目前为止，有雨量站 34 处，其中水文站四处，站网密度为 220 平方公里一个站。观测系列最长的有 27 年，短的只有几年。

流域以上小流域测站有四处，孔家坡是沁河上游控制站，面积 1358 平方公里。1958 年开始观测，迄今有 23 年资料。沁水油房站 414 平方公里，1957 年开始观测，有 24 年资料。此外东河的永和，马壁河的刘村因资料较少，都未分析。

蒸发资料，在各水文站进行观测，资料很少，系列长短不一，均于 1967 年后停测。

三、流域模型

模拟降雨径流过程的流域模型有两个主要部分：

第一，是水务平衡部分，主要处理降雨的损失，推求净雨总径流过程；

第二，是流域的调蓄作用部分，它决定着径流的时间分配。

以往的研究多偏重于第二方面。率状储模型与流芳漫释模型通径处理损失方面为多，近几年来，国内外水文工作者已加强这方面的研究。

沁河流域模型，考虑了降雨，产流空间分布的不均匀性，在计算上采用单元计算产流和汇流的分散模型。对北方半湿润半干旱地区，这种处理是十分必要的。

(一) 产流分析

1. 产流模型

根据沁河流域产流特性和资料条件，采用了一层入渗模型，这个模型是基于下渗率 f_t 随土壤含水率 PA 的变化率 df/dPA 与下渗率 f 有着线性关系，于是相应的微方程为：

$$df/dPA = -K(f - f_c)$$

从 0-t 取积分

$$\int_0^t \frac{d(f-f_c)}{(f-f_c)} = \int_0^{PA} -K dPA$$

$$\text{其解 } f_t = f_c + (f_0 - f_c) \exp(-KPA) \quad (1)$$

上式即为沁河产流模型的基本形式。式中 f_c 为稳渗率， f_0 为 $PA=0$ 时的入渗率。K 为随土壤特性而变的常数。

在具体应用时，选为定 K 值，优选 f_0 并建立 f_0 和时段最大降雨强度 I (大流域用降雨总量) 的关系， $f_0=f(I)$ ，须过这样处理的产流模型如下图 2。

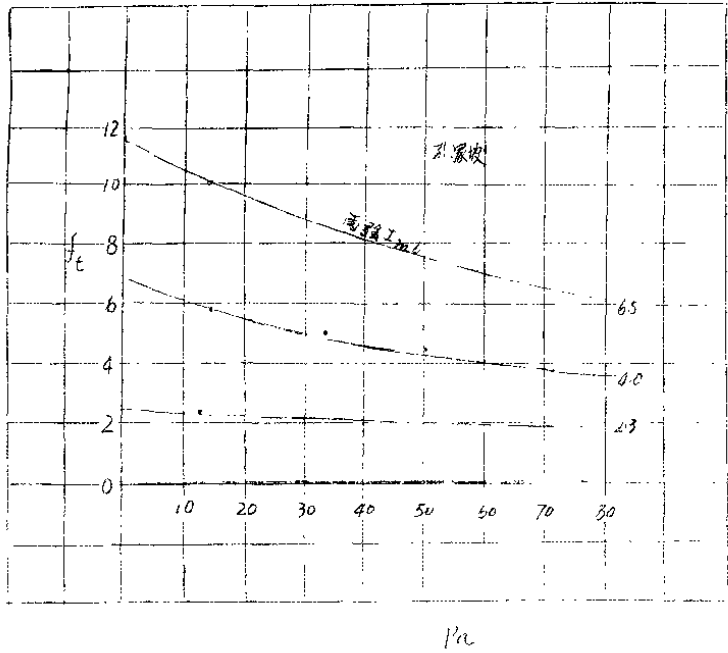


图 2. 孔家河站入渗曲线

只考虑一层入渗时，径流的平衡条件可认为：降雨后，一方面要满足蒸发、翻沟、填洼的损失，同时也有邻接河槽的流域和不透水面积上产生的地表径流；对下渗另则作为当时土壤含水量的一部分。模型的概化为下图 3 的形式。

如不为总蒸发损失，则将这部分损失作为下渗而进入下层土壤层。

方公里
站网
的只
制站，
沁水
此外东
长短不

净雨
分能
器模
已加
性，
半漫

模型，
PA

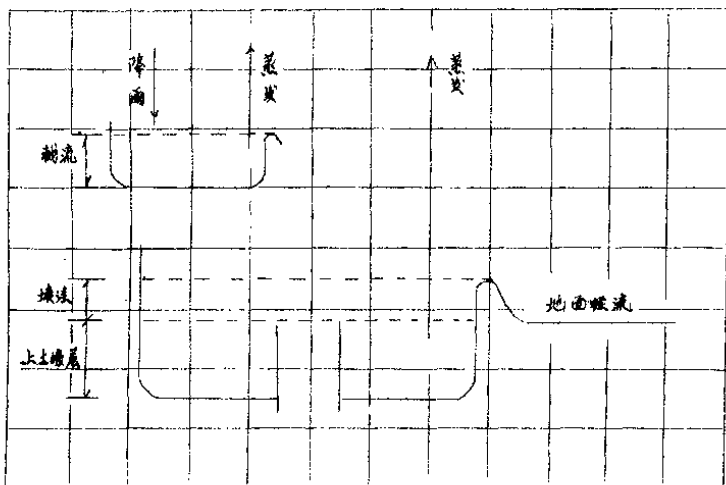


图3 产流模型示意图

2, 净雨计算

产流模型按照上述设想, 在已知初始前期影响雨量 PA_0 和 f_0 时, 时段净雨可按如下表格进行计算。

日期			时段号	PA_0	入渗量	$P < f_t$	$P > f_t$	
月	日	时	$P(mm)$	(mm)	$f_t(mm)$	$PA+P$	$PA+f_t$	$R=P-f_t$
7	14	0		19.3				
		1	3.9		14.3	23.2		
		2	4.1		13.8	27.3		
		3	13.3		13.3	40.6		
		4	21.1		11.3		52.4	9.3
		5	11.9		10.7		63.1	1.2
		∴	∴		∴	∴	∴	∴

3, 参数分析

在模型中, 参数确定, 和计算精度有着密切的关系。本次

计算 f_t 按
料 $I_m = 85$
概念模型
如式(1)中
壤含水率

式(2)在
 f_t 即为

要参做
跨中, 定
在跨夫
色夫
造的
流大
数

序号	...
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	

计算 f_c 按传统方法是另，大墩最大缺水另及用黄委以往分析资料 $I_m=85$ 毫米，其它参故可采用两种方法定另，一种是像一般概念模型一样按一定的物理意义和计算方法，给出定另数据，如式(1)中 K 值，可利用入渗试验资料，点绘入渗率 f_c 和相应大墩含水另 P_A 的关系确定。如令(1)式 $f_c=0$ ，取对故

$$\ln f_c = \ln f_0 - K P_A \quad (2)$$

式(2)在半对故纸上呈直线， K 即为此直线的斜率。 $P_A=0$ 时的 f_c 即为 f_0 值。

参故定另的另一种方法，是先给出某一参故的初值，对主要参故应用优选的方法，然后再对参故的初值进行调整。在实际中，这种方法可行的，也是目前应用较广泛的。例如我们在特定入渗曲线参故时，首先给出 K 的初值 0.005 （根据W.C. 包夫顿的实验资料）优选 f_0 ，经多次试算最后定 K 值为 0.01 。

从油房和孔家坡两个成表流域，22次洪水分析结果看，优选的参故 f_0 和时程最大降雨强度有关，油房站流域较小，采用最大时程平均强度关系较好，孔家坡用六小时最大平均强度较好。见图4 A和B。

两站相应的经验公式

$$\text{油房站} \quad f_0 = 0.28 I_2^{1.5} \quad (3)$$

$$\text{孔家坡} \quad f_0 = 1.32 I_6^{1.16} \quad (4)$$

用上述关系分别对两站进行了产流计算，结果见表2和表3。

表3 油房站计算净雨和实测值比较表

序号	洪水号	实测最大小时		f_0	实测净雨深		$ R_{实}-R_{计} $	合格情况
		入流另 Q_m	降雨强度 I_2		$R_{实}$	$R_{计}$		
1	69621	155	12.2	15.0	4.1	5.87	0.403	✓
2	71622	148	11.5	10.9	4.3	9.20	0.14	×
3	7321	302	7.8	6.1	13.0	18.34	0.41	×
4	66715	374	12.2	20.0	10.2	7.27	0.30	✓
5	71731	474	6.5	4.6	4.9	5.56	0.13	✓
6	74807	252	10.3	9.3	6.8	8.37	0.23	✓
7	73707	315	7.7	6.0	10.9	13.84	0.27	✓
8	66730	327	8.3	6.7	5.3	7.38	0.39	✓
9	67812	160	7.0	5.2	6.9	13.38	0.94	×
10	71720	262	7.2	5.4	4.6	4.63	0.01	✓

表4 孔家坡站计称净雨和实测值比较表

序号	洪水号	实测最大流量 Q_m	最大六小时 降雨强度 I_6	f_0	实测净 雨量 $R_{实}$	计称净 雨量 $R_{计}$	$ R_{实}-R_{计} $	合格情况
							$R_{实}$	
1	66725	200	3.9	6.4	1.62	2.0	0.2	✓
2	66726	133	3.7	6.0	1.64	3.6	1.2	✓
3	67909	157	3.1	2.9	3.53	3.8	0.08	✓
4	69723	166	6.4	11.4	1.95	2.4	0.2	✓
5	71622	205	4.0	6.6	1.04	2.0	0.9	✓
6	71706	106	5.2	8.9	2.84	1.5	0.5	✓
7	71709	133	4.5	7.6	4.01	0.5	2.9	✗
8	72813	124	1.7	2.4	0.72	2.7	2.75	✓
9	73610	196	3.9	6.4	1.37	2.2	0.9	✓
10	73826	26.9	2.0	3.0	0.133	0.9	5.8	✓
11	74723	53.8	1.6	2.3	0.053	1.3	23.53	✓
12	75728	206	2.0	5.0	5.47	4.6	0.16	✓

关于误差评定一般采用两种标准进行，一种为相对误差小于20%，另一种为净雨深的绝对误差 $\leq \pm 3$ 毫米，计称结果只要满足两者之一即为合格。按此标准油房站的合格率为70%，孔家坡站的合格率为90%。

全流域产流计称。

全流域的产流计称，不同于前述油房和孔家坡两个代表流域的分析。而是采用分单元扣损的方法，对一次洪水，各单元流域的入渗曲线，有的参数是共同的，像 f_0 ，同时也有不同的，如各单元流域的初始前期影响雨量PAO。采用这种方法既可简化优选计称方法，同时也可区别单元入渗曲线的差异。计称机优选结果见下表5。

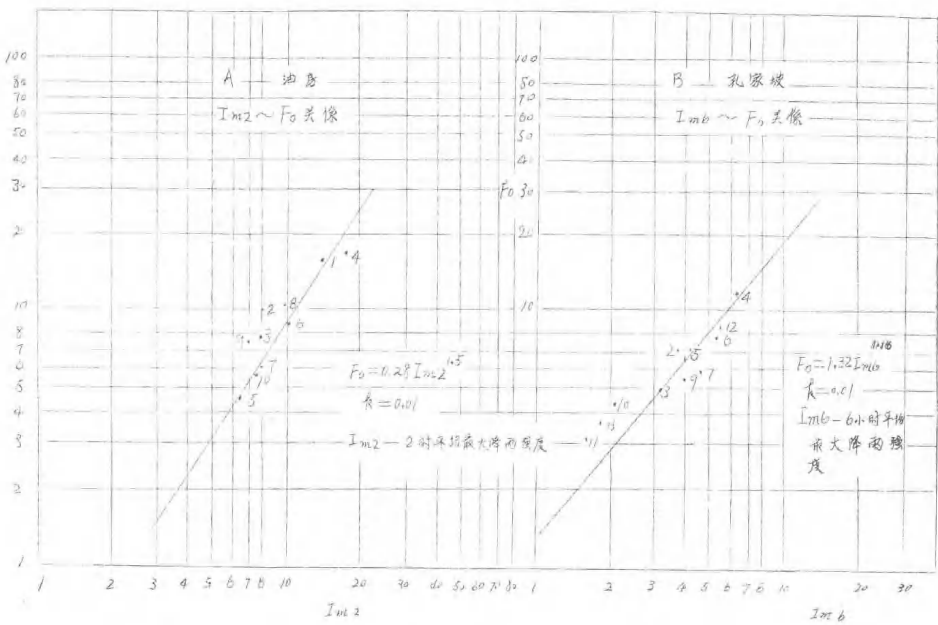


图 4 F_0 和时程降雨强度的关系

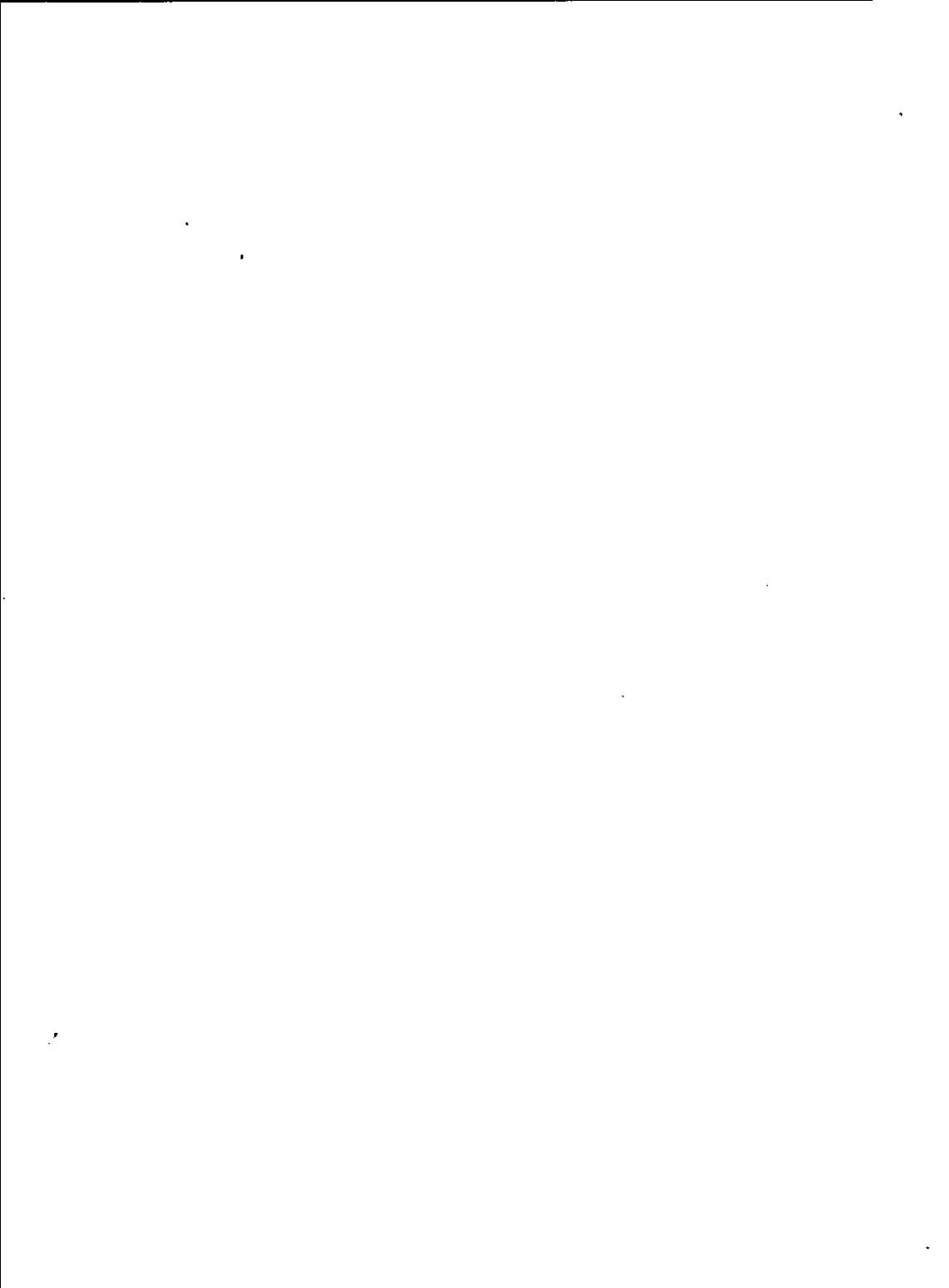


表5 沁河洹城产、汇流状况调查成果及其特征表

站号	汛期 流量 R _汛	汛期 流量 R _汛	汛期 流量 R _汛	汛期 流量 R _汛	汛期 流量 R _汛	汛期 流量 R _汛	汛期 流量 R _汛	汛期 流量 R _汛	汛期 流量 R _汛	汛期 流量 R _汛	暴雨中心位置				产流区		产流区 平均雨 量P	汛期 平均 流量
											上游	中游	下游	右	左	上游		
1	54813	10.9	10.46	1900	2200	8.0	-0.60	✓	✓	✓	✓	✓	✓	2233	303	80.4	1.59	
2	58802	13.5	13.95	1990	1935	8.5	-0.60	✓	✓	✓	✓	✓	6013	88.2	76.8	5.71		
3	58812	27.5	26.58	1448	1850	4.0	-0.60	✓	✓	✓	✓	✓	7273	100	112.8	3.6		
4	66722	15.1	15.8	1670	1862	5.0	-0.60	✓	✓	✓	✓	✓	4918	67.6	105.1	3.96		
5	68721	4.5	4.70	920	775	10.3	-0.60	✓	✓	✓	✓	✓	2893	37.1	72.6	2.83		
6	71821	26.9	27.9	1695	2616	4.0	-0.60	✓	✓	✓	✓	✓	6506	89.5	107.7	3.73		
7	73805	1.3	1.36	533	193	13.2	-0.60	✓	✓	✓	✓	✓	1096	14.9	53.1	1.08		
8	73827	2.5	2.49	424	299	13.0	-0.60	✓	✓	✓	✓	✓	408	5.6	56.9	1.57		
9	74807	1.4	1.4	238	102	14.0	-0.60	✓	✓	✓	✓	✓	1620	22.3	71.1	2.02		

流域以上入渗参数的综合

f_0 是入渗模型的重要参数，每次洪水随着降雨条件的变化都不一样。变化范围大约在4.0~14.0毫米/小时。在这样大的流域中，用什么方法综合，方能在预报中付诸应用是一个重要问题。我们分析了北河流域暴雨的空间分布和产、汇流特性。发现一次洪水的产流面积往往只占全流域面积的50%左右，个别小到百分之几。但也有完全同质的特点，产流区的分布多在流域的中下游。这对参数综合提供了有利的条件。经过分析我们对每次洪水划分了产流区，产流区的标准是换算雨大于50毫米的面积计算。利用产流区一次平均降雨深和 f_0 建立关系如图5。

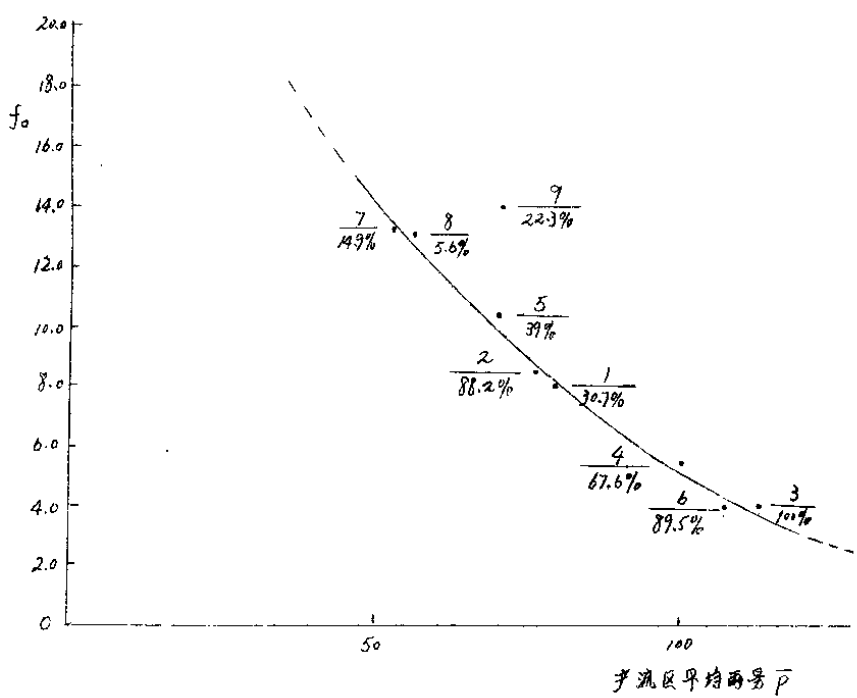


图5 f_0 和产流区次平均降雨深关系

从关系图上看，和单元流域 $f_0 \sim I$ 关系线（图4）是矛盾的。其原因主要是构造 f_0 时不同的处理方法有关。单元流域优选

是...
降...
是...
间...
就...
只...
是...

f_0 是在一个小流域上进行的，时按降雨量是小流域的平均值，降雨强度愈大，流域面上积水愈多，这时将产生较大的压力入渗，因此，入渗强度随降雨强度增加而增大。在北方类似情况是很多的。

而图5 f_0 的优选是在大面积上分单元进行的，由于降雨空间分布不均匀性，假定各单元流域用一个 f_0 时，降雨小的单元面积则不能产流，由于实测总径流量的控制，这样计算净雨量，就必须要在几个降雨较大的单元流域，要使总径流量不变，而只有降低 f_0 才能满足次径流深的平衡。而实测径流深和次降雨量是成正比的关系，所以 f_0 和次降雨量（或产流区的次降雨量）是反比关系。是否确是图5的物理机制，还有待进一步研究。其经验关系

$$f_0 = 48000 p^{-2} \quad (5)$$

图5中个别离群的数据往往是由雨量站的代表性差所造成，这种关系的合理性和实用性有待今后大量暴雨洪水资料验证。从现有分析，按式(5)关系验证几次洪水结果如下表6

表6 流域以上分单元产汇流计算成果表

序号	洪水号	实测洪峰流量 $Q_{实}$	计算洪峰流量 $Q_{计}$	实测径流深 $R_{实}$	计算径流深 $R_{计}$	$\frac{R_{实}-R_{计}}{R_{实}}$	合格情况
1	54813	1900	2200*	10.9	10.3	0.06	✓
2	58802	1390	1300*	13.5	13.7	0.01	✓
3	58812	1448	1800*	27.5	31.0	0.13	✗
4	66722	1670	1300*	15.1	17.6	0.16	✓
5	68721	920	770*	4.5	5.2	0.16	✓
6	71821	1695	2600*	26.9	26.7	0.01	✓
7	73805	533	190*	1.3	1.7	0.30	✓
8	73827	434	300*	2.5	2.6	0.04	✓
9	74807	238	100*	1.4	3.2	1.28	✓

* 参数值 f_0 和各次优选结果十分接近，因此计算洪峰流量可直接用优选值代替。

以上表计算结果，计算净雨合格率均在89%。洪峰流量对

件的影响比较大，在流域的右侧，在利米河和图5。

3
10%

属的。
优选

几次大水较接近。

(二) 流域汇流分析

流域汇流和产流一样是先从乳家坡和油房站两个代表流域进行分析，确定参数的综合关系后，用在各单元面积上，予以投影求出各单元流域的洪水过程线通过河道洪水演算在总出口断面上作线性叠加，就是作出该断面洪水过程线。

单元流域的计算方法是以瞬时单位线模型为基础，对参数的应用给予适当改进，众所周知的数学模型为

$$U(t) = \frac{1}{K\Gamma(n)} e^{-t/K} (t/K)^{n-1} \quad (6)$$

用直接积分法求出时段汇流曲线：

$$P(t) = \begin{cases} 1 - e^{-m} \sum_{\lambda=0}^{n-1} \frac{m^\lambda}{\lambda!} & m < m_K \text{ (即 } t < \Delta t) \\ e^{-M} \sum_{\lambda=0}^{n-1} \frac{M^\lambda}{\lambda!} - e^{-m} \sum_{\lambda=0}^{n-1} \frac{m^\lambda}{\lambda!} & m \geq m_K \text{ (} t \geq \Delta t) \end{cases} \quad \text{---- (7)}$$

式中 $m = t/K$, $m_K = \Delta t/K$, $M = m - m_K$

这个公式对参数 n 只适用于整型数，是和利用 S 曲线求时段单位线的差别。但根据参数 n 的变化特性对四捨五入取整后并不影响计算精度。

单位线滞时 nK 是根据实测资料用优选法定义的，自标函数应用如下形式：

$$S = \sum_{t=1}^{t_s} (Q_{实}(t) - Q_{计}(t))^2 \quad (8)$$

流域汇流计算中，可考虑暴雨洪水的非线性影响，我们采用了线性汇流模型参数非线性化的处理方法。即根据上雨单站优选的参数 nK 和主雨峰降雨强度建立关系。即

$$nK = F_0 \left(\frac{I}{I_0} \right)^{-\theta} \quad (9)$$

式中 F_0 是时段净雨强度 I 为 10 毫米时的值数； θ 是非线性指数。

参数 F_0 和 θ 均为地区性参数，随流域特性而变，和河长

L 坡度丁有较好的函数关系，即 $F_{10}, \theta = f\left(\frac{L^2}{\sqrt{J}}\right)$ 。

这种处理非线性的方法，是行之有效的。

为了有利于参战的地区综合，这次分析单位强汇流时，选用了一部分淮河上游中小流域的资料，点绘了 F_{10}, θ 和流域特征值的关系如下图 6 和图 7。

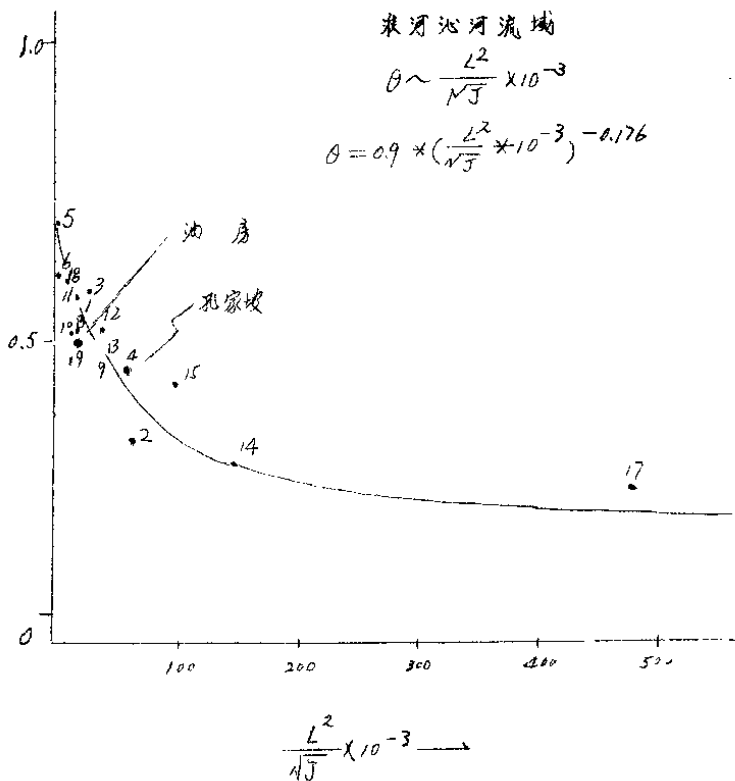


图 6 非线性指数 θ 和 $\frac{L^2}{\sqrt{J}}$ 关系

个代表流域
面积上，予
以综合在总
流域。

(6)

At)

----- (7)

物求时段
取整后并

，目标函

(8)

，我们求
上游单站

(9)

是非线

和河谷