

# 流域产流事件模型

## ——论水文模型的简化

薛焱森 叶巧云

(四川联合大学,成都,610065)

**提 要** 本文着重流域产流的主要环节,以流域下渗容量分配曲线与产流过程的关系为依据,吸收斯坦福流域水文模型的优点,简化总体结构,改进提高,减少模型参数,并与常规的前期影响雨量算法结合起来,建立流域产流事件模型。此模型只有4个优选参数,它克服了现有模型计算复杂和难于掌握应用等缺点,力求简便易行,能用于实际洪水预报,提高使用效果。在汉江支流丹江和洵河两个流域应用此模型,共模拟了21年102次洪水,并用6年26次洪水资料检验模型;又在汉江月河与渠江州河东林站应用此模型,它们的产流合格率均达80%以上,经验表明,此模型简便易行,使用效果好,是值得研究推广的新模型。

**关键词** 流域产流 模型简化 洪水事件 前期影响雨量

### 1 基本概念与模型总体结构

研究流域水文模型的目的是为了模拟原型的输出,预报未来的水文过程。要求模型在主要功能上与原型相似,使模拟的输出与实测值尽可能接近,满足精度要求,在这种情况下,模型越简单越好。目前,国内外的情况大体相似,由于现有模型一般都较复杂,实际应用的甚少。

美国斯坦福流域水文模型(第IV号),以下简称S-IV模型,其物理概念较明确,是世界著名的模型之一。但是,其总体结构复杂,参数太多(接近30个),不易掌握,难于实际应用。对数千平方公里的中等流域,其坡面汇流历时短,不必单独计算坡面流,直接计算流域汇流过程。S-IV模型以超渗产流概念为基础,并考虑时段下渗能力分布不均匀特性,计算方法较简便,是该模型的核心部分和主要特点,产流事件模型吸收了这种合理的结构。

降雨产流属于高度的非线性问题,降雨之后,是否产流,决定于流域初始蓄水状态和降雨强度等因素,客观上存在着“阈值”效

应。这些水分消耗于表土的湿化、填洼和植物截留等方面,是降雨产流之前必须跨的“门槛”。在产流事件模型中,新设了这一功能。

为了简化计算,节省计算工作量,把行之有效的有效的前期影响雨量 $P_e$ 的算法与产流事件模型结合起来,交替使用。在无雨(或小雨)日,不需要预报洪水,则逐日计算 $P_e$ 值;若有降雨,要产生洪水时,则启动产流事件模型,模拟预报洪水。这样,避免了不必要的繁杂的连续模拟过程。

这两个阶段必须衔接起来。在启用产流事件模型时,要给定土层蓄水量的初始值(状态变量)。显然,这些初始值与 $P_e$ 值之间有直接的关系,这些关系的表达式称为“连接结构”,它是本模型有待处理的关键环节之一。

基于上述概念和构想,提出产流事件模型的总体结构框图,如图1所示。

模型输入:降雨过程 $p \sim t$ 、蒸发能力 $E_p$ 、 $P_e$ 值和前期起涨流量 $Q_0$ ;模型输出:产流计算的中间输出有地表径流和地下径流(净雨);模型系统的总输出有出流过程 $Q \sim t$ 、上层蒸发及下土层蒸发量。

流域蓄积量设计为两层:上层蓄水量

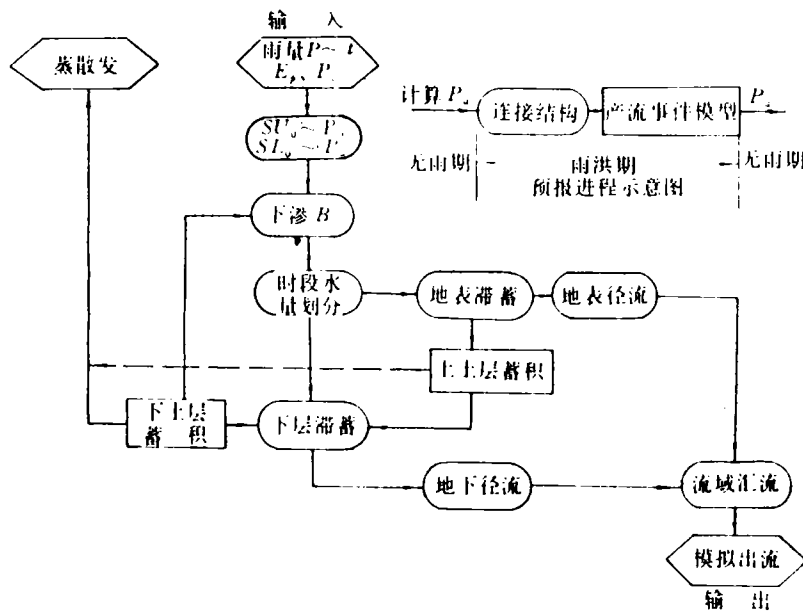


图1 流域产流事件模型框图

和下土层蓄水量。另外有地表滞蓄水量，它补给地表径流和上层蓄积，不计蒸发损失。

产流事件模型分时段连续模拟计算，其计算时段长采用我国现行水情观测时段长  $\Delta t=3\text{h}$  或  $6\text{h}$ 。

流域汇流演算采用时变分布参数模型（本文不介绍），见参考文献[3]。也可以采用其它的流域汇流计算方法。

## 2 模型微结构及模拟公式

无论在少雨地区或湿润地区，下渗损失总是影响产流量的主要因素。任意时段流域各处的下渗能力是不均匀的，客观上有其分配曲线。如图2所示，R·H·Bugsy和J·N·Luthin曾用径流场的实验资料求得一种分配曲线。对于实际流域，下渗分配曲线的线型无法求得，而且，它随时都处在变化之中，为了简便实用，粗略地概化为直线是可行的。

观察山坡径流形成现象可以发现，地面径流和壤中流在进入河槽之前相互转化，在其产生和运行过程中，不能截然分开，本文将

这两种径流成分合并，称为地表径流。它由地表滞蓄水量补给。

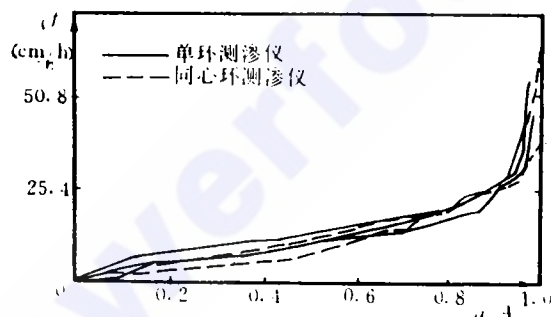


图2 实验下渗容量分配曲线

时段水量划分(扣损计算)，如图3所示。横标  $a/A$  表示下渗容量小于和等于某个指定值的分布面积相对值。 $\overline{ob}$ 为某个时刻流域下渗能力分配直线。 $P$ 为时段降雨量；面积  $F$  表示时段直接下渗增量；面积  $DS$  表示时段地表滞蓄增量，它是补给地表径流及上层蓄水量的水源，不计蒸发损失。

流域产流事件模型各环节的模拟公式和计算方法分述如下：

### 2.1 下渗指标 $B$

对特定流域，某个时刻的下渗能力决定

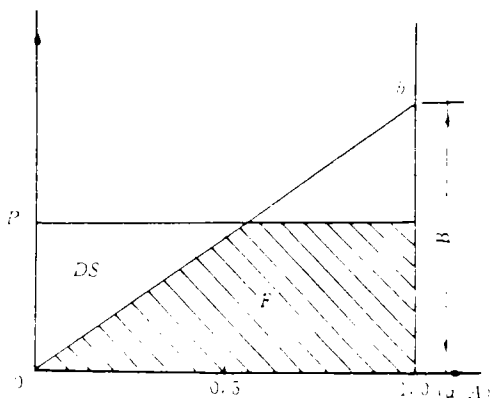


图3 时段水量划分

于当时的土壤蓄水量。假定流域下渗能力为直线分配,则  $B$  值反映当时流域下渗水平,称为下渗指标。流域平均下渗能力为  $B/2$ 。

当  $SL_1/NL \leq 1$  时

$$B = FB/2^{4 \times SL_1/NL} \quad (1)$$

若  $SL_1/NL > 1$ , 则

$$B = FB/2^{4+2(SL_1/NL-1)} \quad (2)$$

式中  $SL_1$ ——时段初下土层蓄水量(mm);

$NL$ ——下土层额定蓄积量(mm);

$FB$ ——下渗参数(mm/1时段)。它反映流域土壤的下渗水平,是时段最大下渗强度。

(1)和(2)式中,以时段初的下土层蓄水量  $SL_1$  反映该时段土的湿状态,决定  $B$  值的大小。下土层额定蓄积量  $NL$  不是饱和含水量,而是一个相对比较的标准值。 $NL$  和  $FB$  是本模型的两个优选参数,需要调试模型率定其数值。

如图4所示,  $B \sim SL_1/NL$  关系曲线上端以  $FB$  值为极限,图中,  $FB=1$ , 若  $SL_1=0$ , 则  $B=1=FB$ ; 曲线的下端,随  $SL_1$  的增大,  $B$  值递减,趋近于零,基本上符合下渗率的变化规律。

## 2.2 时段水量划分

根据模型的基本概念,在图3中,当降雨量为  $P$  时,与下渗分布直线比较,容易确定

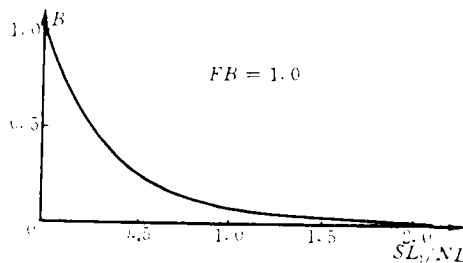


图4  $B \sim SL_1/NL$  关系

某时段的各种水量。分两种情况计算:

当  $P \geq B$  时,

$$F = B/2; \quad DS = P - B/2$$

若  $P < B$ , 则

$$F = P - P^2/2B; \quad DS = P^2/2B$$

由于降雨使土壤含水量增大,当上层相对含水量大于下土层相对含水量时,自由重力水将从上层渗透到下层,称为滞后下渗。用下述公式模拟时段滞后下渗量  $PC$ :

当  $SU_1/NU > SL_1/NL$  时

$$PC = 0.000118 \times FB \times NU \times (SU_1/NU - SL_1/NL)^3 \quad (3)$$

若  $SU_1/NU \leq SL_1/NL$  时,则  $PC=0$ 。无滞后下渗。

式中  $SU_1$ ——时段初上层蓄水量(mm);

$NU$ ——上层额定蓄积量(mm),它是相对标准值,也是一个待定的优选参数。

直接下渗  $F$  和滞后下渗  $PC$  是进入下土层和补给地下径流的水量。因此,本模型的下渗量与一般的地表入渗概念不同,它是针对下土层的。另外,下渗能力或下渗指标  $B$  受控于下土层蓄水量  $SL_1$ ,而与上层无直接关系。从这一概念来理解,上层更接近于表土层,主要体现初期损失量。流域水文模型是概念性模型,不拘泥于严格的自然物理概念。我们曾用两者之和  $(SU_1 + SL_1)$  替代(1)和(2)式中的  $SL_1$ ,同样是可行的,但是,并无明显的改善。

## 2.3 产流量计算

在产流之前,降雨量要跨越“阈值”才

能产流。如图 5 所示,在模型中,将“阈值”效应转化为控制产生地表径流的条件,即:上层相对含水量  $SU_1/NU$  必须超过一定的界限值  $DR$  才能产生地表径流;否则,不产流。 $DR$  是第 4 个优选参数。设地表滞蓄增量  $DS$  分配给上层蓄水量的比例系数为  $K_1$ ,则补给地表径流的系数为  $(1-K_1)$ 。

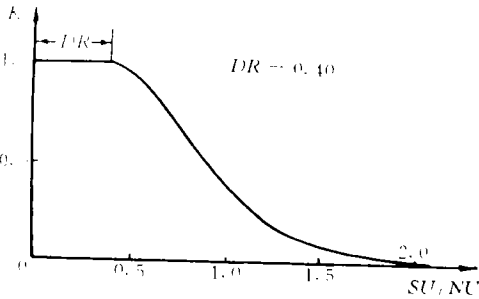


图 5  $K_1 \sim SU_1/NU$  关系

当  $\frac{SU_1}{NU} > DR$  时,

$$\text{参数 } Z_1 = 2 \times \left| \frac{SU_1}{NU} - DR \right| \quad (4)$$

$$K_1 = \left( \frac{1}{1+Z_1} \right)^{Z_1} \quad (5)$$

若  $\frac{SU_1}{NU} \leq DR$ , 则  $K_1 = 1.0$ 。这时,全部  $DS$  补给上层蓄水量,不产生地表径流。

时段地表径流产流量为:

$$RS = (1-K_1) \times DS \quad (6)$$

地下径流时段产流量  $RG$  与  $SL_1$  有关,  $SL_1$  越大,通过土层补给潜水的强度就大;反之,则补给强度小。假设  $K_2$  表示时段下渗量  $(F+PC)$  补给地下径流的比例系数。 $K_2$  的变化规律如图 6 所示。

当  $SL_1/NL \leq 1$  时,

$$K_2 = \frac{SL_1}{NL} \left( \frac{1}{1+Z_2} \right)^{Z_2} \quad (7)$$

若  $SL_1/NL > 1$ , 则有:

$$K_2 = 1 - \left( \frac{1}{1+Z_2} \right)^{Z_2} \quad (8)$$

$$\text{式中 } Z_2 = 1.5 \left| \frac{SL_1}{NL} - 1.0 \right| + 1.0 \quad (9)$$

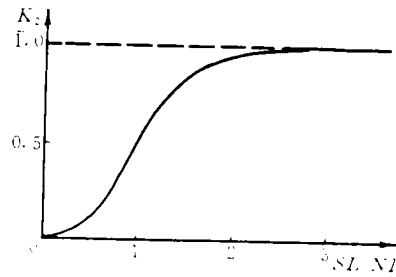


图 6  $K_2 \sim SL_1/NL$  关系

时段地下径流产流量为:

$$RG = K_2 \times (F+PC) \quad (10)$$

#### 2.4 模型的状态变量计算

在分时段连续模拟洪水时,各种产流与扣损计算都与该时段的流域状态有关。本模型的主要状态变量有上层蓄水量  $SU$  和下层蓄水量  $SL$ 。为了简化计算,用时段初的  $SU_1, SL_1$  代替时段平均值。在完成时段产流量之后,根据水量平衡原理,计算时段末的状态变量值,它们就是下一时段初的值,逐时段迭代,连续模拟整个洪水的出流过程。

模型的蒸发量计算方法,是分时段扣去蒸散发能力;其计算原则是先扣上层,后扣下层含水量,直至满足蒸散发能力为止。上层时段末的蓄水量为:

$$SU_2 = SU_1 + K_1 \times DS - PC - E_1 \quad (11)$$

式中  $E_1$  为时段蒸散发能力,它由日蒸散发能力折算求得。日蒸散发能力  $E_p$  用多年各月雨日平均蒸散发能力值。按(11)式算得的  $SU_2$  必须满足  $SU_2 \geq 0$  条件;若  $SU_2 < 0$  时,则取  $SU_2 = 0$ ,这时,有剩余蒸散发能力  $E_2$ ,即:

当  $SU_2 < 0$  时,则取

$$E_2 = |SU_2|,$$

否则,  $SU_2 \geq 0$  时,则  $E_2 = 0$ 。下层时段末的蓄水量为:

$$SL_2 = SL_1 + (1-K_2)(F+PC) - E_2 \quad (12)$$

### 3 产流事件模型的连接结构

每次启用产流事件模型,都要确定开始降雨时刻的初始状态变量  $SL_0$  和  $SU_0$  的数值,它是把计算  $P_a$  值阶段与启用事件模型阶段衔接起来的中间环节。从物理成因上分析,显然,  $SU_0$  和  $SL_0$  与  $P_a$  值之间有密切的相关关系,可以表示为一般的形式:

$$SU_0 = f_1(P_a) \quad (13)$$

$$SL_0 = f_2(P_a) \quad (14)$$

从总体组成而言,它们是一个“连接结构”,应根据流域的具体情况(下垫面条件和计算  $P_a$  所使用的参数等),分析建立这种关系式。在模型优选参数已初步确定时,利用实测降雨径流资料,分别调试各次洪水的初始值  $SU_0$  和  $SL_0$ ,使模拟产流量与实测产流量之差值在允许误差以内。最后,点绘  $SU_0 \sim P_a$  和  $SL_0 \sim P_a$  经验关系曲线,用曲线拟合方法建立连接结构的经验表达式。例如,丹江荆紫关站的连接结构如下:

当  $P_a < 60\text{mm}$  时,

$$SU_0 = 349.3(100 - P_a)^{-0.533} - 20\text{mm} \quad (13a)$$

若  $P_a \geq 60\text{mm}$

则

$$SU_0 = 100(100 - P_a)^{-0.194} - 20\text{mm} \quad (13b)$$

又当  $P_a \leq 78\text{mm}$  时,

$$SL_0 = 0.74P_a + 145\text{mm} \quad (14a)$$

若  $P_a > 78\text{mm}$ , 则

$$SL_0 = 320 - 2/12(P_a - 70)^{-1.39}\text{mm} \quad (14b)$$

另外,我们建立洵河向家坪站的连接结构为:

当  $P_a < 50\text{mm}$  时,  $SU_0 = 0.2P_a + 12\text{mm}$

若  $P_a \geq 50\text{mm}$ , 则  $SU_0 = 0.44P_a\text{mm}$ ;

当  $P_a < 90\text{mm}$  时,  $SL_0 = 1.422P_a + 112\text{mm}$ ;

若  $P_a \geq 90\text{mm}$ , 则  $SL_0 = 240\text{mm}$ 。

由两个实例表明,本模型的连接结构是一个“软结构”,它具有高度的适应性。它是给模型研制者预留的一个唯一的“接口”,让研

制者有机会把产流事件模型与流域特性和研究者本人的经验融合起来,以资提高预报精度,以求得到满意的模拟效果。或许可以说,设置连接结构是本模型的一大特点和优点。通过它实现了将连续模型改造成事件模型的设想,达到简化流域水文模型的目的。

### 4 参数分析与优选

本模型共有 4 个优选参数,即是  $NU$ 、 $NL$ 、 $FB$  和  $DR$ 。它们之间既相对独立,又相互影响。上土层额定蓄积量  $NU$  控制着植物截留、填洼和近地表土层的蓄水量,其作用是保持水分和调节水分,影响产流量及其时程分配。 $NL$  是控制土层有效蓄积量的重要参数,影响下渗强度和产流总量,其数值与流域多年平均降雨量有关。参数  $DR$  反映初损量对产流量的影响,控制小洪水或久旱后初期降雨的产流量。 $FB$  反映流域土壤的下渗水平,透水性强的土壤其  $FB$  值大。 $NL$  与  $FB$ , 在模拟下渗能力时,相互关联。通过分析和应用模型的经验表明,4 个参数的灵敏度,从大到小,依次为  $NU$ 、 $NL$ 、 $FB$  和  $DR$ 。在调试模型优选参数时,应注意这些关系和性质。

由于模型简单,各次洪水分别计算,因此,对计算机的容量要求不大,一般的 IBM 微型计算机都能满足需要。分析电算一般采用人机对话式方法调试模型。

初定模型参数时,可参考以下资料:

(1) 在季节性降雨的地区

$$NL = 100 + 0.25P_0(\text{mm})$$

在全年降雨较均匀的地区,取

$$NL = 100 + 0.13P_0$$

其中  $P_0$  为多年平均降雨量。

(2)  $NU$  与  $NL$  有一定的关系,并和地形与植被条件有关,参考表 1 选用。

(3)  $FB$  值的大小与计算时段长有关,若计算时段  $\Delta t = 6h$ , 建议一般流域的  $FB$  值的

范围为 40~80mm 之间。

表 1 NU 值

流域情况	NU
陡峭的山坡、植被较少、洼地蓄积量小	0.06NL
中等坡度、中等植被、中等洼地蓄积	0.08NL
植被良好或森林、土壤龟裂、缓坡大量洼地蓄积	0.14NL

(4) 控制产流的“门槛值” $DR$ ，建议取值范围一般为 0.3~0.8。

根据模型的总体结构和各环节的模拟公式，拟定计算方法和步骤，设计电算程序。主体部分的计算框图，见图 7。对于较大的流域，可划分若干个单元区进行产流计算，然后，再作流域汇流计算，求得系统的总输出。

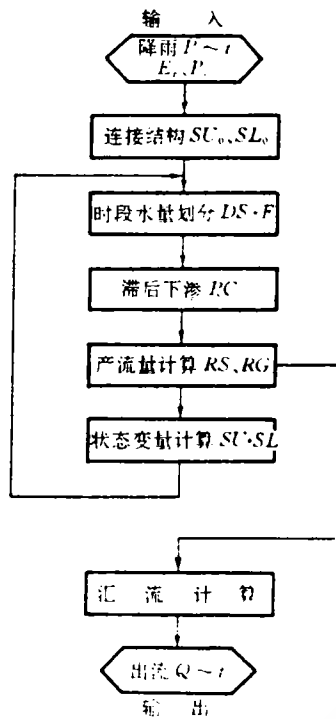


图 7 产流事件模型计算框图

## 5 应用实例

流域产流事件模型已应用于汉江的支流洵河、丹江、月河及四川省渠江支流州河流域，建立洪水预报方案，均获得了成功的经验。以洵河向家坪站预报方案为例，说明此模

型的应用方法及情况。

洵河向家坪站以上流域集雨面积为 6 448km<sup>2</sup>，植被较好，地势陡峻，属山区性河流。选用 7 个报讯雨量站建立预报方案，预测时段长为 6h(也是计算时段长)。用 1975~1984 年资料建立方案，率定参数；再用 1972~1974 年资料校核检验模型，共模拟了 13 年 63 次洪水。

### 5.1 无雨或小雨期 $P_a$ 值计算

计算方法与常规的算法相同。分站从每年 4 月 1 日开始计算  $P_a$  值，连续计算至某次洪水开始降雨时刻为止，再计算同时刻的流域平均  $P_a$  值。将此值作为该次洪水的模型输入之一，模拟出流过程。 $P_a$  的计算公式为：

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

且  $P_a \leq I_M$

$$K = 1 - E_p / I_M$$

式中  $E_p$  为各月多年平均日蒸发能力，在汛期(4~10 月)，以  $E_{601}$  蒸发器日蒸发量代替  $E_p$ ； $I_M$  为最大初损值，在洵河预报方案中，取  $I_M$  为 100mm。各个开始降雨时段的折减系数  $K_{11}$ 、 $K_{20}$ 、 $K_2$  仍用上述计算公式，其时段蒸发能力为日蒸发能力的折减值，例如：

$$K_{20} = 1 - E_{p,20} / I_M, \text{ 其中 } E_{p,20} = E_p / 2$$

洵河流域的  $K$  值，见表 2 所示。

表 2 消退系数  $K$  值表(洵河)

月份	4	5	6	7	8	9	10	11
$K$	0.95	0.93	0.92	0.93	0.94	0.97	0.97	0.98
$K_{11}$		0.995		0.991				0.998
$K_{20}$		0.990		0.982				0.995
$K_2$		0.984		0.973				0.993

注： $K_{11}$ 、 $K_{20}$ 、 $K_2$  是由雨日蒸发量计算求得的数值。

### 5.2 连接结构

根据产流事件模型的总体结构、模拟公式和算法，设计电算程序。利用各次洪水的降雨径流资料，使模拟径流量与实测径流量尽可能接近，调试各次洪水的初始状态变量  $SU_0$  和  $SL_0$ 。经过分析与探索，建立洵河向家坪站的“连接结构”，如前所述。

### 5.3 模型参数的优选和方案精度评定

见表 3 所示。

### 5.4 洵河预报方案的汇流计算采用分布参数汇流模型

此处从略。见参考文献[3]。洵河、丹江、月河与州河等流域的产流事件模型参数,和其模拟成果的精度,见表 3 所示。

表 3 流域产流事件模型应用实例统计表

流 域	F (km <sup>2</sup> )	I <sub>M</sub> (mm)	模 型 参 数				Δt (h)	洪水 次数	合格率 (%)
			NU	NL	FB	DR			
洵河向家坪	6448	100	35	250	60	0.40	6	52	82.7
丹江荆紫关	7060	100	40	300	60	0.33	6	50	80.0
月河长枪铺	2814	100	36	257	56	0.60	3	18	88.9
州河东林	6462	35	15	200	60	0.40	6	30	86.7

## 6 结 语

通过分析研究,我们得到几点认识、经验和初步的结论。

1. 现有的流域水文模型一般都较为复杂,参数多,不易掌握,并与现有的经验脱节,难于实际应用。为了水文预报电算化、自动化和现代化,我们认为应该发展简化的实用的概念性模型。

2. 产流事件模型反映了主要因素对产流和汇流的影响,吸收了 S—N 模型的合理结构,简化改进,设置控制产流的 DR 值来体现“阈值”效应。增长计算时段,减少参数,大大简化了计算,使模型合理、简便、实用。

3. 本模型把经典的行之有效的 P<sub>0</sub> 算法与产流事件模型结合起来,预留连接结构这个“接口”,使模型的研制者有机会把模型与流域特性和个人的经验融合起来,提高使用效果和精度,具有高度的适应能力。

4. 由洵河、月河、丹江和州河等 4 个流域的实际应用经验表明:产流事件模型的结构较简单,参数少,应用效果好,预报精度较高,其合格率均达 80% 以上,计算简便、实用。

### 参 考 文 献

- 1 袁作新主编. 流域水文模型. 水利电力出版社, 1990 年 3 月
- 2 薛焱森. 斯坦福流域水文模型 N 的分析与研究. 四川水利. 1984; 第 4 期
- 3 薛焱森. 流域汇流的分布参数模型. 成都科技大学学报. 1989; 第 4 期

致谢: 李燕红、徐廷坚、杨柳依等参加分析计算; 丹江口水库管理局李芳岩等的支持和协助, 谨此致谢。

(收稿日期: 19930611)

## Basin Runoff Yield Model— On simplification of Hydrology Model

Xue Yansen Ye Qiaoyun  
(Sichuan United University)

**Abstract** The main parts of the basin runoff yield are stressed. According to relationship between distribution curve of basin infiltration capacity and runoff yield process, the author absorbs the advantages of Stanford basin hydrology model, simplifies and improves the general structure and decreases model parameters. In the light of conventional computation method for antecedent influence rainfall, basin runoff yield event model is formed. The model has only four optimized parameters. It is better than existing model computation methods which are complicated and hard to master and use, strives to be simple and feasible. the model can forecast actual flood and improves utilization effects. The model was applied in Danjiang and Xunhe which are tributaries of Hanjiang. 102 flood processes within 21 years were simulated and checked by data of 26 flood processes within 6 years. It is also used in Donglin hydrological station on Zhouhe which is the tributary of Qujiang and on Yuehe which is the tributary of Hanjiang. Their rate of quality for runoff yield exceeds 80%. The experinces has shown that the model is simple and feasible, and worth to research and poplarize. It is a mew model with good application effects.

**Key Words** basin runoff yield, model simplification, flood event, antecedent influence fainfall.