

遥感资料在 SCS 模型产流计算中的应用*

魏文秋 谢淑琴

(武汉水利电力学院)

1991年10月30日收稿

摘 要

SCS 模型在降雨径流关系上,考虑了土壤类型、土地利用和前期土壤含水量状况,使产流计算建立在较合理的基础上。但由于反映上述因素的综合指标 CN 的地区性、前期土壤含水量分级太粗、土壤分类的不通用性等,在我国直接应用误差太大。本文分析了误差太大的原因,提出了对 SCS 模型产流计算的改进方法;并采用土壤质地分类,提出用混合聚类法进行土壤分类。改进后的 SCS 模型产流计算不仅提高了精度,还可用来进行降雨径流预报。

关键词 产流计算 土壤质地 混合聚类

一、引 言

SCS 模型是美国农业部水土保持局 (Soil Conservation Service, 简称 SCS) 在本世纪 50 年代初研制的小流域设计洪水模型。由于它在降雨径流关系上,考虑了流域下垫面的特点,如土壤、坡度、植被、土地利用等,并有效地列入水文模型的定量计算之中,还可考虑人类活动对径流的影响,模型结构简单,使用方便,因此得到广泛应用。70 年代美国 R. M. 雷根和 T. J. 杰克逊首次将遥感资料用于 SCS 模型中^[1]。从影响径流形成的主要因素——土地利用、土壤类型、前期土壤含水量来看,当时仅用遥感资料对土地利用进行了定量分析。在以后的研究中,直接利用遥感影像辨识曲线号码 CN (Curve Number),它是反映土地利用、土壤类型、前期土壤含水量的一个综合指标。但是,SCS 模型直接移用到我国误差太大。本文将分析其原因,提出改进方法。采用土壤质地分类,提出混合聚类法对土壤进行分类识别,使模型能用于降雨径流预报。

二、SCS 模型的产流计算及存在的问题

SCS 模型的产流计算公式为:

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{(P - I_a)}{P + S - I_a} & P \geq I_a \\ R &= 0 & P < I_a \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, I_a 为初损; S 为流域当时的可能滞留量; P 为一次降雨的总量; R 为径流量,它们均以英寸为单位。

* 本项目得到水利水电基金资助。

由于 I_a 不易求,根据经验取

$$I_a = 0.2 S \quad (2)$$

又由于 S 不便取值,引入一个无因次参数 CN,并规定与 S 的关系为:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (3)$$

前述, CN 是反映土地利用、土壤类型、前期土壤含水量的一个综合指标。因此,上述 3 种因素中任一种发生变化,都会引起 CN 的变化。应用遥感资料的 SCS 模型把前期土壤含水量 (AMC) 分为 3 级: AMC I 为干旱情况, AMC II 为正常情况, AMC III 为湿润情况。具体确定时以此次降雨前 5 天降雨量为依据。对于土地利用,分成农业、市郊和城镇 3 大类。而土壤则根据其下渗和透水能力强弱,依次分为 A、B、C 和 D 4 类。根据大量实测资料的分析结果,制成了一个 CN 值查算表,表 1 是在 AMC II 条件下的 CN 查算表。对于 AMC I、AMC III 条件时,可以通过换算得到。若流域上有一场降雨 P ,则可根据流域各处的土壤类型、土地利用和前期土壤含水量状况,查算相应的 CN 值,进而通过公式(1)–(3),计算出本场降雨所形成的径流量 R 。

表 1 SCS 模型的 CN 值 (AMCII)
Table 1 CN values of SCS model (AMCII)

土地覆盖类别	土 壤 类 型			
	A	B	C	D
草地	39	61	74	80
耕作区	72	81	88	91
森林:				
针叶林	25	55	70	77
落叶林	25	55	70	77
空闲地	49	68	79	84
农业居民区	51	68	79	84
工商业区	89	92	94	95
城市居民区:				
单套房屋	61	75	83	87
低密度	57	72	81	86
高密度	77	85	90	92

但是,在我国直接应用 SCS 模型,计算误差太大。如我们曾用于安徽省城西径流实验流域的产流计算,总体合格率仅 11.1%。又如穆宏强直接用 SCS 模型对湖北省石桥铺流域进行产流计算,总体合格率为 14.3%¹⁾;沈健聪在四川省峨眉万善桥流域的产流计算,直接应用 SCS 模型的总体合格率为 33.3%²⁾。这说明 SCS 模型直接用在我国进行降雨径流计算是不合适的。

误差太大的原因主要是:(1) CN 值受地区性影响较大,因此某一地区的 CN 值未必能在另一地区使用;(2) 影响 CN 值的前期土壤含水量仅分 3 级,太粗略,致使 CN

1) 穆宏强, SCS 模型在石桥铺流域的应用研究,武汉水利电力学院硕士学位论文,1990 年 11 月。

2) 沈健聪, SCS 模型的应用与改进,武汉水利电力学院硕士论文,1987 年 5 月。

值发生突变; (3) 公式中规定的 I_a 与 S 、 S 与 CN 的关系是经验性的, 并有地区性影响; (4) 土壤分类具有一定的任意性。

为了使 SCS 模型能在我国得到应用, 必须根据我国具体情况, 对模型参数的计算进行改进, 土壤分类要重新定义和划分, 以提高降雨径流计算精度。

三、SCS 模型的改进

由于直接应用 CN 值查算表进行产流计算误差太大, 不少学者探讨 CN 值的地区分布规律, 有的则直接研究产流计算公式(1)中参数 I_a 和 S 的物理意义和确定方法。

从公式(1)中知, 若降雨量 P 小于初损 I_a , 则不会产生径流。因此, I_a 是产流前的降雨损失, 主要包括植物截留、填洼及初期下渗量, 它们与植被、地形、土壤类型、土地利用方式和前期土壤含水量等有直接关系。通常, 对一特定流域, 植物截留、填洼可以近似视为一个常数。而初期下渗量在土壤类型、土地利用方式已确定的情况下, 主要取决于前期土壤含水量。若前期土壤含水量大, 下渗损失就小; 反之, 若前期土壤含水量小, 下渗损失就大。土壤含水量在无补给的条件下, 主要消耗于蒸发, 因此, 可以用蒸发作为表征土壤含水量大小的指标, 与初损 I_a 建立关系。通常, 前期蒸发量大, 表示土壤含水量小, I_a 就大; 反之, 前期蒸发量小, 表示土壤含水量大, I_a 就小。若以前期水面蒸发 E_a 表示前期土壤蒸发, 则有

$$\text{线性关系} \quad I_a = a + b \cdot E_a \quad (4-a)$$

$$\text{指数关系} \quad I_a = a \cdot e^{bE_a} \quad (4-b)$$

$$\text{幂函数关系} \quad I_a = a \cdot E_a^b \quad (4-c)$$

式中, a 、 b 为待定常数, 可以根据实测资料来确定。

流域当时的可能滞留量 S 相当于流域当时的最大缺水量, 它是田间持水量与当时土壤含水量的差值。对特定土壤, 田间持水量是一个常数, 因此 S 的大小主要取决于产流前的土壤含水量, 即土壤含水量小, S 就大; 反之, 土壤含水量大, S 就小。通常, 土壤含水量大小常用前期影响雨量 P_a 表示, P_a 大, 表示土壤含水量大, S 就小; 反之, P_a 小, 表示土壤含水量小, S 就大。由此, 可以建立 S 与 P_a 的关系为

$$\text{线性关系} \quad S = c - d \cdot P_a \quad (5-a)$$

$$\text{指数关系} \quad S = c \cdot e^{-dP_a} \quad (5-b)$$

$$\text{幂函数关系} \quad S = c \cdot P_a^{-d} \quad (5-c)$$

式中, c 、 d 为待定常数, 可以根据实测资料来确定。

四、土壤类型的划分及识别

初损 I_a 和流域当时的可能滞留量 S 与土壤类型和土地利用方式有关, 即在其他条件相同的情况下, 土壤类型和土地利用方式不同, I_a 和 S 也是不同的。因此, 在确定 I_a 和 S 之前, 必须先确定流域各处的土壤类型和土地利用方式。下面主要探讨土壤类型的划分和用遥感资料的识别方法, 土地利用方式的识别也可以参照该方法进行。

为了从卫星像片上识别土壤的不同类型,并满足水文上的要求,通常采用土壤质地分类,即按土壤颗粒组成的比例特点,对土壤进行分类。从水文上看,土壤颗粒大小不同,其持水和下渗能力也不同。土壤颗粒大,其持水能力差,下渗率大;反之,土壤颗粒小,其持水能力强,下渗率小。土壤的这一特性直接影响着 I_s 和 S 的大小。从光谱特性看,土壤颗粒大小不同,其反射率也不同。土壤颗粒大,表面粗糙,被吸收的光谱多,而被反射的光谱较少,致使反射率小;反之,土壤颗粒小,反射率大。

根据粒径大小,可将土壤颗粒(土粒)分为砂粒、粉粒、粘粒 3 种成分,它们的相对含量决定了一种特定土壤的质地名称。由于土粒的分级标准不同,相对应的土壤质地分类有所不同,质地名称也有一些差异;既使质地名称相同,而它的各级粒径及其含量的百分率也不一致。常见的土壤质地分类有国际制、美国制、日本制及中国制等。为了简化计算和便于比较,本文采用国际水文界通用的土壤质地分类,即根据砂粒、粉粒、粘粒组成比例,将土壤分为砂土、砂壤土、壤土、粘壤土、粉粘土和粘土等 6 类^[2]。

根据土壤光谱特性,本文提出用混合聚类法进行土壤分类。该法主要有两个步骤: 首先用模糊最优聚类法对训练样本做聚类分析,求出训练样本的统计参数;然后用上述统计参数对整个区域进行最大似然率分类。

1. 模糊最优聚类

设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 是 R^k 中的样本集,分为 m 类,则它的软分划矩阵具有如下形式:

$$u = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{m1} & u_{m2} & \dots & u_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中,矩阵元素 u_{ij} 具有以下特性:

- (1) $u_{ij} \in [0, 1]$ $i = 1, 2, \dots, m;$
 $j = 1, 2, \dots, n$
- (2) $\sum_{i=1}^m u_{ij} = 1$
- (3) $\sum_{j=1}^n u_{ij} > 0$

对应 X 的一个 Fuzzy 软分划,给出它的一个聚类中心

$$v = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$$

式中, $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{ik})$
 $i = 1, 2, \dots, m$

此处所用的隶属度和聚类中心由下两式

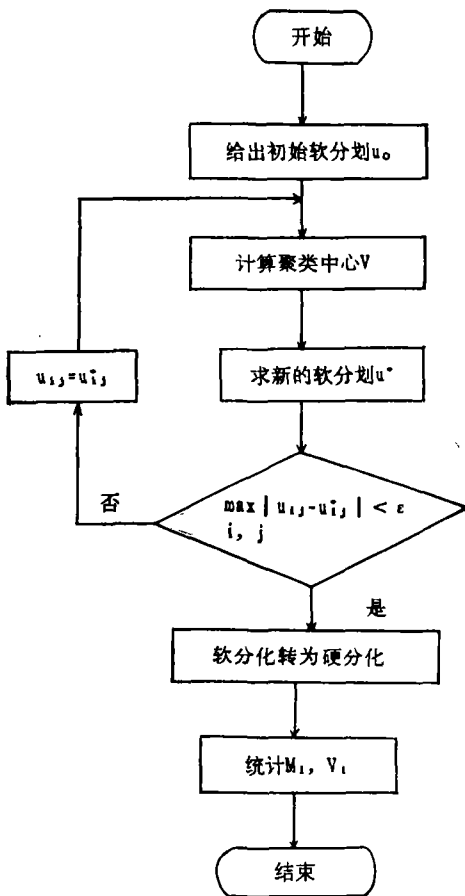


图 1 模糊最优聚类计算框图

Fig. 1 Calculated flow Chart of optimal Fuzzy cluster analysis

计算:

$$u_{ij} = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\rho(v_i, x_j)}{\rho(v_i, x_j)} \right)^2} \quad (7)$$

$$i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$$

$$v_{il} = \frac{\sum_{j=1}^n u_{ij}^2 x_{jl}}{\sum_{j=1}^n u_{ij}^2} \quad (8)$$

$$i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n; l = 1, 2, \dots, k$$

$$\text{式中, } \rho(v_i, x_j) = \left\{ \sum_{l=1}^k (v_{il} - x_{jl})^2 \right\}^{1/2}$$

模糊最优聚类计算框图(图 1), 图中的 ε 是迭代允许误差。

2. 最大似然率分类^[3]

该方法假定各种类别的地物光谱的条件概率 $P(x|\omega_i)$ 服从高斯正态分布, 其判别准则是似然比最大, 在先验概率 $P(\omega_i)$ 相等的情况下, 像元归属于概率最大的类别。即 $P(x|\omega_i) \geq P(x|\omega_j)$ 时, x 应属于第 ω_i 类。概率函数的具体形式为:

$$P(x|\omega_i) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} |M_i|^{1/2}} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} (x - v_i)^T \cdot M_i^{-1} (x - v_i) \right] \quad (9)$$

式中, $|M_i|$ 为协方差矩阵 M_i 的行列式, v_i 为均值向量, 它们已在模糊最优聚类计算中确定; M_i^{-1} 为 M_i 的逆阵; $(x - v_i)^T$ 为 $(x - v_i)$ 的转置阵; n 是维数; $i = 1, 2, \dots, m$ 是分类数。

混合聚类法将模糊分类与统计分类、无监分类与有监分类相结合, 它不需要占用太多的内存, 也不需要预先寻找训练区, 在一般计算机上就可实现。

为了说明土壤类型的识别方法, 本文选择了安徽省城西径流实验流域进行土壤分类。根据该流域地理位置和卫星像片情况, 并考虑尽量减少植被对土壤信息的影响, 选择了 1987 年 12 月 7 日的南京幅 TM 图像。

首先, 为了减少植被和山地阴影的影响, 增强土壤信息, 对各波段 TM 图像进行了灰度拉伸、低通滤波及比值变换等预处理, 得到 m 幅图像。

其次, 选择特征向量, 即将预处理后获得的 m 幅图像作为 m 个原始测量值, 从中选择 n ($n < m$) 个特征向量, 共有 C_m^n 种可能的选择。为了简化计算并能得到最佳分类, 根据土壤类型判读的最佳波段及其组合^[4,5], 从 C_m^n 中选择出 16 种特征向量图。

第三, 对 16 种特征向量图分别用混合聚类法进行分类, 并计算它们的 B-距离, 其中最大 B-距离所对应的特征向量分类图, 即为最佳分类^[6]。通过计算, 由 TM_2 、 TM_4 为特征向量的分类图为最佳分类。

第四, 分类后, 每一个像元都有了一个对应的类别, 但发现图像上有许多单个像元的

类型与邻域类型不同。这些孤立像元类型的存在,可能是因为局部像元的数据出现偏差所致,可以利用相邻地物的空间关系对图像进行平滑^[6],而后勾绘出分类图。

最后,通过实地考察和对有关的地形图、土壤图等分析研究,确定分类图中的土壤类别^[7]。图 2 为安徽省城西径流实验流域土壤分类结果。

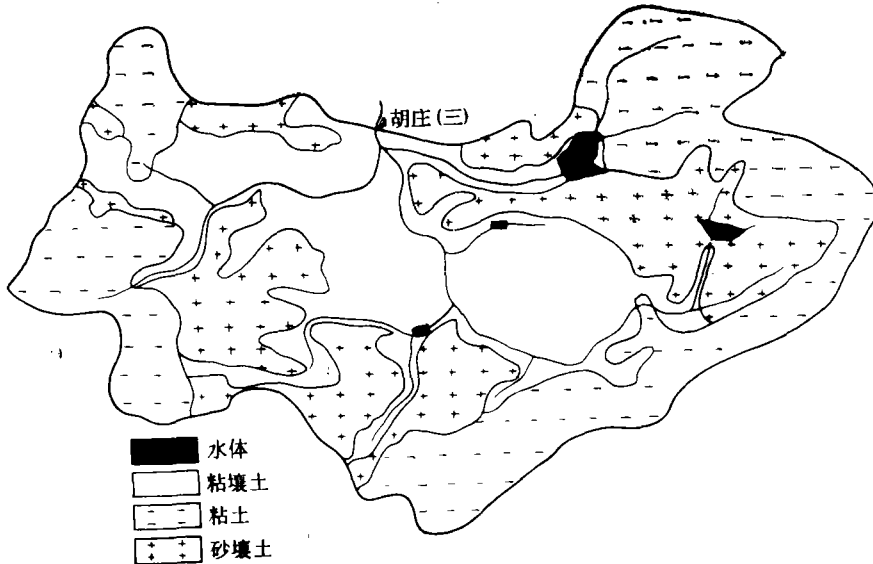


图 2 城西径流实验流域土壤分类图

Fig. 2 Soil classification map of CHUZHOU experimental basin

五、城西径流实验流域的产流计算

城西径流实验流域位于安徽省滁县城西水库上游清流河上,出口断面在胡庄,流域面积 82.1km²。产流计算步骤如下。

1. 确定土壤类型与土地利用方式

用遥感资料确定的土壤类型与土地利用方式的成果列于表 2。

表 2 单元面积流域特征及模型参数

Table 2 Basin characteristics and model parameters of unit area

单元面积序号	土壤类型	土地利用方式	参 数				面积权重(%)
			<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	
1	砂壤土	旱地	0.622	1.587	35	0.0605	27.9
2	粘壤土	水田	0.0929	2.0	110	0.0354	33.5
3	粘 土	林地	0.0422	1.879	98	0.0478	38.6

2. I_a 与 E_a 关系式的选定及参数 a 、 b 的确定

根据各个单元面积上的雨洪资料确定 I_a 及相应的前期蒸发量 E_a (此处用前 5 天水面蒸发的累积值), 分别点绘在直角坐标、单对数坐标和双对数坐标纸上, 其中双对数坐标纸上关系最好, 即采用关系式

$$I_a = a \cdot E_a^b \quad (10)$$

相应也就可以确定出 a 、 b 值来, 各单元面积的 a 、 b 值列于表 2 中。

3. S 与 P_a 关系式的选定及参数 c 、 d 的确定

根据各个单元面积上的雨洪资料及相应的 I_a 值, 由公式(1)反推出 S 值, 前期影响雨量用相应前 5 天降雨累积值。按前述方法点绘 $S \sim P_a$ 。经比较, 以选用关系式

$$S = c \cdot e^{-dP} \quad (11)$$

为好, 相应各单元面积的 c 、 d 值列于表 2 中。

4. 产流计算

对于一场降雨 P , 先计算该次降雨前 5 天的水面蒸发累积值 E_a 和前 5 天的降雨累积值 P_a , 再由选定的关系式及参数计算各个单元面积上的 I_a 和 S , 最后由公式(1)计算出本次降雨在各个单元面积上产生的径流量, 加权平均得全流域的径流量。

本次共计算了 22 场降雨产生的径流, 与实测的径流相比, 有 18 场达到合格要求, 总体合格率为 82%, 具体结果列于表 3。

表 3 城西径流站产流计算成果表

Table 3 Computed and observed results of runoff in CHUZHOU experimental basin

洪号	降雨量 (mm)	实测 径流量 (mm)	计算 径流量 (mm)	绝对 误差 (mm)	相对 误差 (%)	合格与否
75604	101.7	21.8	23.0	1.2	5.7	合格
75624	145.2	123.9	134.2	10.3	8.3	合格
75701	56.2	43.7	31.1	-12.6	-28.9	不合格
75705	69.2	60.5	58.8	-1.7	-2.9	合格
75816	150.2	76.7	57.2	-19.5	-25.4	不合格
751011	71.1	47.5	33.6	-13.9	-29.2	不合格
77406	39.3	8.5	8.6	-0.2	-1.8	合格
77815	62.2	20.4	18.3	-2.1	-10.2	合格
77915	38.5	13.8	11.1	-2.7	-19.4	合格
771007	47.8	13.1	9.1	-40	-30.2	不合格
79513	34.5	4.6	4.2	-0.4	-8.2	合格
79714	64.0	21.4	18.1	-3.3	-15.6	合格
80624	69.9	33.2	37.9	4.7	14.0	合格
80709	108.6	83.3	92.2	8.9	10.7	合格
80717	163.6	128.7	131.9	5.2	4.1	合格
80812	86.7	48.5	40.0	-8.5	-17.5	合格
81710	90.0	22.0	20.6	-1.4	-6.1	合格
82719	178.8	157.8	171.1	13.3	8.4	合格
82723	74.1	68.4	72.3	3.9	5.6	合格
82822	121.1	62.5	61.7	-0.8	-1.2	合格
83701	104.1	53.0	61.2	-1.8	-2.8	合格
83722	125.1	94.8	93.5	-1.3	-1.4	合格

六、结 语

SCS 模型所以得到广泛应用,最大特点是结构简单,参数少,应用方便,但在我国直接应用误差太大。改进途径一是重新率定 CN 值,二是直接确定初损 I_a 和流域当时的可能滞留量 S 。本文采用了后一途径,分析了 I_a 与前期蒸发量 E_n 、 S 与前期影响雨量 P_n 的关系,并建立了经验关系式。

由于 SCS 模型的产流计算考虑了流域的土地利用、土壤类型和前期土壤含水量状况,在确定 I_a 与 S 时已考虑了前期土壤含水量,余下的土地利用和土壤类型可以根据遥感资料确定。本文主要用混合聚类法对土壤进行分类,并将 SCS 模型的土壤分类改为按土壤质地分类。

改进的 SCS 模型通过安徽省城西径流实验站的应用,总体合格率由改进前的 11.1% 提高到 82%,效果较好。

参 考 文 献

- [1] Ragan, R. M. and Jackson, T. J., Runoff Synthetic Using Landsat and SCS Model, Journal of the Hydraulics Divison, ASCE, Vol. 106, No. Hy5, May, 1980.
- [2] Studies and Reports in Hydrology 20, Hydrological Maps, UNESCO WMO, 1977.
- [3] (美) P. H. 斯韦恩, S. M. 戴维,遥感定量方法,科学出版社,1984年4月。
- [4] K. W. Wong, T. H. Thornburn, M. A. Khoury, 用遥感数据自动识别土壤,遥感技术在土壤和水资源研究中的应用,科学出版社,1981年。
- [5] Michikazu Fukuhara, 从植被区提取土壤信息,农业遥感译文集,上海科技文献出版社,1989年9月。
- [6] 万发贵等,遥感图像数字处理,华中理工大学出版社,1991年7月。
- [7] 中国科学院南京地理研究所,中国土壤,科学出版社,1978年。

THE APPLICATION OF REMOTE SENSING IN RUNOFF FORMATION IN SCS MODEL

Wei Wenqiu Xie Shuqin

(Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering)

Abstract

SCS model is a small basin design flood model proposed by Soil Conservation Service (SCS) of USDA. At rainfall-runoff relationship, SCS model gives consideration to land used, soil type and antecedent soil moisture. Because the model tallies with the actual situation at rainfall-runoff computation and is simple in structure, this model finds wide application. But soil classification and Runoff Curve Number (CN) in the model are restricted by region, it isn't suited to China. In this paper, we propose the formula to calculate the initial abstraction (I_a) and potential maximum retention (S), as well as the soil type classified by soil texture and application of remotely sensed data. The rationality of improved SCS model is proved by rainfall-runoff calculation in Chuzhou experimental basin, Anhui province.

Key words Calculation of run off yield Soil texture Complex cluster