

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.05.001

水循环综合模拟系统的降雨产流模型研究

刘昌明^{1,2}, 李 军³, 王中根¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所/陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875;

3. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所/山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041)

摘要: 重点阐述国内自主研发的水循环综合模拟系统(HIMS, hydro-informatic modelling system)降雨产流模型的新发展。HIMS 原有产流计算主要是基于降雨动态入渗机制的 LCM 模型, 该产流模型是通过大量野外小流域观测试验提出的经验模型。为进一步揭示其物理机制, HIMS 研究团队基于物理机制清晰的 Green-Ampt 模型, 提出了新的 GAF 模型。从理论上通过 GAF 模型可以直接推导出 LCM 模型, 以及 SCS-CN 模型, 并证明了 LCM 模型是 GAF 模型的高精度幂指数近似, 而 SCS-CN 模型是 GAF 模型的倒数线性近似解简化; 通过对 GAF 模型解析解的深入分析, 提出了两参数 SCS-CN 修正模型, 使之包含了雨强的影响。

关键词: 水循环模拟; HIMS; 降雨产流模型; LCM 模型; GAF 模型; SCS-CN 模型

中图分类号: P33 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2015)05-0377-07

Study on rainfall-runoff model of hydro-informatic modeling system

LIU Changming^{1,2}, LI Jun³, WANG Zhonggen¹

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: This paper focuses on the new developments in the rainfall-runoff model of the hydro-informatic modeling system (HIMS). The original rainfall-runoff model of HIMS is the LCM model, which is based on the dynamic rainfall infiltration mechanism and has been built through a large number of field observation experiments in small watersheds. In order to further understand the physical mechanism of the LCM model, the HIMS research team proposes a new GAF model based on the Green-Ampt model whose physical mechanism is clear. Theoretically, the LCM model and the SCS-CN model can be directly derived from the GAF model, it is proven that the LCM model is a high-accuracy power exponent approximation of the GAF model, and that the SCS-CN model is a simplification of the reciprocal linear approximation solution of the GAF model. Based on deep analysis of the analytical solution of the GAF model, a modified SCS-CN method with two new parameters, which considers the impact of rainfall intensity, is proposed.

Key words: water cycle simulation; HIMS; rainfall-runoff model; LCM model; GAF model; SCS-CN model

基于水文学研究发展, 从水系统科学管理的角度看, 亟需多要素、多过程、多尺度水循环综合模拟系统。在此背景下, 2000 年初以来, 笔者在国内较早提出了水循环综合模拟系统(HIMS, hydro-

收稿日期: 2015-08-01

基金项目: 国家自然科学基金重点基金(41330529); 国家自然科学基金(41271048)

作者简介: 刘昌明(1934—), 湖南汨罗人, 中国科学院院士, 研究员, 主要从事水文水资源研究。E-mail: liucm@igsrr.ac.cn

infomatic modelling system)。经过 10 多年的发展与完善,该系统及其定制模型已经在国内外得到广泛验证和应用^[1]。HIMS 最核心的功能是不同的产汇流过程模拟,其中降雨产流计算为最关键之一。

产流理论的提出可追溯到 20 世纪 30 年代霍尔顿产流理论、谢尔曼经验单位线以及等流时线法的提出。进入六七十年代,随着山坡水文机理试验和观测的深入开展,揭示了非饱和侧向流、壤中流和饱和地面径流多种产流过程,提出了变动产流面积的概念^[2]。同期河海大学赵人俊教授揭示了湿润地区的蓄满产流机制,提出了著名的新安江模型^[3]。之后,国内又出现了河北雨洪模型、山西的双超模型、黄河水利委员会水文局的陆浑模型以及辽宁的大伙房模型等。这些模型在干旱半湿润地区的应用效果均不如湿润地区^[4]。干旱半湿润地区产流计算仍然是水文科学研究的难点之一。从微观尺度看,降雨产流是一种超渗机制,是随雨强变化的动态入渗过程,尤其在北方干旱半湿润地区。为此,早在 20 世纪 70 年代初期,笔者在西北地区 40 多个小流域开展了不同下垫面类型与土壤湿度条件下数百次降雨入渗试验,提出了考虑雨强、土壤湿度与土地利用及覆盖等影响的降雨入渗公式(即 LCM 暴雨损失模型,简称 LCM 模型)^[5],揭示了降雨-径流非线性机制,发展了小流域暴雨洪水计算方法。在此基础上,融合水循环其他过程,构建了自主知识产权的 HIMS^[6]。在 HIMS 不断发展的过程中,其产流模型也在持续完善。近期,HIMS 研究团队基于物理试验和理论推导,在 Green-Ampt 模型基础上发展了新的 GAF 产流计算模型。GAF 模型不仅能够直接推导出 LCM 模型,而且能够推导出 SCS-CN 模型,理论上证明了 LCM 模型是 GAF 模型的高精度幂指数近似,而 SCS-CN 模型是 GAF 模型的倒数线性近似解简化。

1 LCM 模型

LCM 模型是一个计算小流域产流期内降雨平均损失率的经验模型。在 20 世纪 70 年代初期,为了研究适合我国实际情况的小流域暴雨洪水计算方法,由铁道部科学研究院西南研究所与中国科学院地理科学与资源研究所联合组成科学研究组,开展了小流域暴雨洪峰流量形成与计算研究。从西南、中南、华东、华北有关单位和径流试验站,收集了大量小流域实测暴雨洪水资料。从黄土丘陵到青藏高原,进行了大量的实地洪水调查和野外试验。利用自行研发的便携式人工降雨器,在各地不同类型下垫面与不同土壤湿度条件下进行了数百次入渗试验。结果表明:当雨强超过渗强时坡地发生漫流,同时在坑洼出现积水,形成积水层,随着水压的增加,产流会有所增大;在坡面全被水层覆盖而发生完全漫流时,即坡面全面漫流,地表积水层出现稳定的渗强。产流时入渗的锋面深度因土地覆盖与土地利用及土壤湿度的不同而异。刘昌明院士根据能量守恒定律,基于土壤入渗的重力、阻力和毛管力分析,提出了能够根据雨强、土壤湿度与土地利用及覆盖的入渗计算方程(LCM 模型):

$$\mu \approx R\alpha^r \quad (1)$$

式中: μ ——流域产流期内降雨平均损失率; α ——流域产流期内平均降雨强度,mm/h; R 、 r ——损失系数,可由土地类型(土地覆盖与土地利用)和前期土壤湿度查表选择^[6]。

2013 年在资料稀缺的西藏水情预报项目中,再次通过不同坡地的人工降雨试验取得入渗计算参数,同时再次证实了 LCM 模型的正确性与普适性。

2 新的 GAF 模型

虽然 LCM 模型具有普适性,它的两参数也很容易通过人工降雨试验获得,但一直没有通过物理数学推导获得直接的证明。为此 HIMS 研究团队李军等^[7-10]以物理机制清晰的 Green-Ampt 模型为基础,通过引入降雨初损量作为一个基本参数,建立了新的产流期降雨损失方程(GAF 模型),有效解决了湿润锋固定不变的吸力水头难以确定的科学难题,并通过严格的理论推导揭示了 LCM 模型的物理机理。

Green-Ampt 土壤下渗方程的一般形式为

$$\frac{K}{\theta_s - \theta_0} (h + h_s + h_f) - \frac{dh}{dt} h = 0 \quad (2)$$

式中: K ——土壤饱和导水率,mm/h; θ_s ——土壤饱和含水量, cm^3/cm^3 ; θ_0 ——土壤初期含水量, cm^3/cm^3 ; h ——土壤水累积下渗深度,mm; h_s ——地表积水深度,mm; h_f ——湿润锋固定不变吸力水头,mm。

Green-Ampt 模型在实际应用时,难点之一是湿润锋固定不变吸力水头的计算,限制条件之一是地表有积水,应用于降雨下渗时的问题之一是模型中没有直接包含降雨强度。为了解决这3个问题,对 Green-Ampt 模型引入一个新的变量:地表产流前降雨初损量 I_a 。假设为均匀降雨,在时刻 t_p 的土壤下渗率 f 等于降雨强度 P ,此后地表开始超渗产流。根据水量平衡方程可以得到 $f = (\theta_s - \theta_0) \frac{dh}{dt}$;同时,把 I_a 折算为土壤水累积下渗深度 $h_a, h_a = I_a / (\theta_s - \theta_0)$;并设在 t_p 时 $f = P$ 可得

$$\frac{1}{I_a} = \frac{1}{(h_s + h_f)(\theta_s - \theta_0)} \frac{P}{K} - \frac{1}{(h_s + h_f)(\theta_s - \theta_0)} \quad (3)$$

式(3)既表现了降雨初损量与雨强的关系,也内涵了可以用降雨初损量代替湿润锋固定不变吸力水头。重设时间变量,令 $f = P$ 时, $t = 0$;设产流期内降雨累积损失量为 F ,即有

$$h = h_a + \frac{F}{\theta_s - \theta_0} = \frac{I_a + F}{\theta_s - \theta_0} \quad (4)$$

由此可得新的产流期降雨损失方程(GAF 模型):

$$KF + PI_a - (I_a + F) \frac{dF}{dt} = 0 \quad (5)$$

式(5)的隐式解为

$$t = \frac{F}{K} + I_a \frac{K - P}{K^2} \ln \left(1 + \frac{K}{PI_a} F \right) \quad (6)$$

式(5)的显式解为

$$F(t) = I_a \left\{ -\frac{P}{K} + \frac{K - P}{K} W \left[\frac{P}{K - P} \exp \left(\frac{P}{K - P} + \frac{P}{K - P} \frac{K^2 t}{PI_a} \right) \right] \right\} \quad (7)$$

式(7)是产流期内降雨累积损失量计算公式。式中的 $W(*)$ 是 Lambert W 函数,它被 Lambert^[11] 定义为 $y = W(*) \exp(W(*))$ 。

新的 GAF 模型有4个特点:(a)超渗产流期内地表有积水,满足了 Green-Ampt 模型的地表有积水限制条件;(b)引入降雨初损量,解决了湿润锋固定不变吸力水头的计算困难;(c)不直接包含土壤饱和含水量和土壤初期含水量,一旦给定了降雨初损量,方程与土壤初期含水量无关;(d)直接包含了降雨强度,方便了降雨产流的计算。

地表径流量的计算公式为

$$Q(t) = Pt - I_a \left\{ -\frac{P}{K} + \frac{K - P}{K} W \left[\frac{P}{K - P} \exp \left(\frac{P}{K - P} + \frac{P}{K - P} \frac{K^2 t}{PI_a} \right) \right] \right\} \quad (8)$$

产流期内降雨损失率计算公式为

$$f(t) = \frac{dF}{dt} = K + \frac{P - K}{1 - \frac{P}{K} + \frac{K - P}{K} W \left[\frac{P}{K - P} \exp \left(\frac{P}{K - P} + \frac{P}{K - P} \frac{K^2 t}{PI_a} \right) \right]} \quad (9)$$

3 GAF 模型与 LCM 模型

为了便于分析,对 GAF 模型进行无量纲化处理。令

$$m = \frac{P}{K} \quad c = \frac{m}{m - 1} \quad G(t) = \frac{F(t)}{mI_a} \quad x = \frac{K^2 t}{PI_a} \quad (10)$$

可得 GAF 模型显式解的无量纲形式:

$$G(x) = -1 - \frac{1}{c} W[-c \exp(-c - cx)] \quad (11)$$

式(11)中的函数 $G(x)$ 是 Lambert W 函数基础上的新函数,它有许多不同于 Lambert 斜函数的新性质。其特性之一是幂指数近似特性。设 $G(x)$ 幂指数函数的近似通式为

$$G(x) \approx ax^b \quad (12)$$

对 $G(x)$ 在点 $x=x_0$ (此时 $G_0=G(x_0)$) 泰勒级数展开取线性项,可得系数:

$$b = \frac{c - \frac{\ln(1 + G_0)}{G_0}}{c - \frac{1}{1 + G_0}} \qquad a = \frac{G_0}{\left[G_0 - \frac{\ln(1 + G_0)}{c}\right]^b} \tag{13}$$

在 $W(*)=(-1.4,-1), y<-e^{-1}$ 范围内,幂指数近似解能够很好地模拟函数 $G(x)$,相关系数均大于0.9965。

$$a = -1.2 \frac{1}{m} + 2.15 \tag{14}$$

$$b = -5.194\left(1 - \frac{1}{c}\right)^4 + 6.994\left(1 - \frac{1}{c}\right)^3 - 3.851\left(1 - \frac{1}{c}\right)^2 + 1.496\left(1 - \frac{1}{c}\right) + 0.597 \tag{15}$$

重新整理式(12)可得

$$\frac{F(t)}{mI_a} \approx a \left(\frac{K^2 t}{P I_a}\right)^b = a \left(\frac{K^2}{P^2 I_a}\right)^b (Pt)^b \tag{16}$$

即 LCM 模型:

$$F(t) = a \frac{P}{K} I_a \left(\frac{K^2}{P^2 I_a}\right)^b (Pt)^b = R(Pt_z)^r \tag{17}$$

其中

$$R = a \frac{P}{K} I_a \left(\frac{K^2}{P^2 I_a}\right)^b \qquad r = b \tag{18}$$

幂指数近似解与解析解(式(7))的对比结果见图1。

从表1和图1可见,对于10种主要土壤质地 GAF 模型产流期内降雨累积损失的幂指数近似解的最大误差不超过8%,平均误差小于4%,因此 GAF 模型产流期内降雨累积损失的计算可以使用幂指数近似解来快速计算,这正是 LCM 暴雨损失经验模型的物理机制。

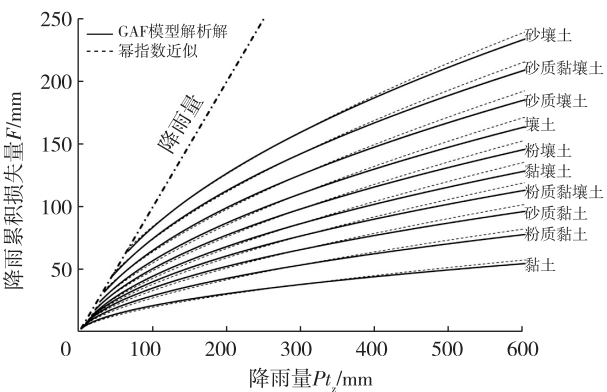


图1 GAF 模型产流期内降雨累积损失的解析解与幂指数近似解 ($P_2=600\text{ mm/h}, t_z=1\text{ h}$)

Fig. 1 Comparison between analytical solution during runoff period of GAF model and power exponent approximation solution of accumulated rainfall loss ($P_2=600\text{ mm/h}, t_z=1\text{ h}$)

表1 不同质地土壤的 GAF 模型幂指数近似解

Table 1 Power exponent approximation solution of parameters of ten different soil types for GAF model

序号	土壤质地	$\theta_s/$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	$K_s/$ ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	CN	$I_a/$ mm	R	r	平均 误差/%	最大 误差/%
1	砂壤土	0.437	61.1	50	50.8	5.731 2	0.582 7	0.93	2.46
2	砂质黏壤土	0.398	43.0	55	41.6	4.745 3	0.595 9	1.28	3.19
3	砂质壤土	0.453	25.9	60	33.9	3.761 6	0.614 4	1.75	3.95
4	壤土	0.463	13.2	65	27.4	3.046 0	0.629 0	2.08	4.49
5	粉壤土	0.501	6.8	70	21.8	2.606 2	0.635 9	2.42	4.98
6	黏壤土	0.464	2.3	75	16.9	2.220 2	0.642 1	2.78	5.53
7	粉质黏壤土	0.471	1.5	80	12.7	2.032 4	0.635 7	2.96	5.65
8	砂质黏土	0.430	1.2	85	9.0	1.827 7	0.627 7	3.14	6.54
9	粉质黏土	0.479	0.9	90	5.6	1.596 9	0.615 1	3.16	7.31
10	黏土	0.475	0.6	95	2.7	1.251 4	0.597 7	3.11	7.93

注: θ_s 、 K_s 数据来源于文献[12-13];CN 为 SCS-CN 模型参数。

4 GAF 模型与 SCS-CN 模型

作为降雨产流预测的一个简单实用的方法,SCS-CN 模型很容易使用,方便了数据的查询。然而,该方法有一些缺点,包括:(a)在 SCS-CN 模型中,“实际径流量与最大潜在径流之比等于实际下渗量与最大可能下

渗量之比”这一假设是相当主观的,它的物理基础受到质疑^[14]; (b) SCS-CN 模型没有考虑降雨强度的影响; (c) 它的单一参数 CN 具有高度敏感性^[14-17]。

利用 GAF 模型可以解释 SCS-CN 模型的机制,并可以考虑降雨强度的影响,提出改进 SCS-CN 模型的新方法。

为了简化 GAF 模型的隐式解析解(式(6)),得到它最好的近似解,参数 (KF/PI_a) 的取值范围是一个关键问题。在半干旱半湿润地区,场次降雨量一般不超过200 mm,雨强不会超过100 mm/h,图2显示了在该类地区的参数 (KF/PI_a) 取值范围(总降雨量 $P_t = (0, 200]$ mm, 雨强 $P = (0, 100]$ mm/h, $t \leq 10$ h 和 $P_t + I_a \leq 200$ mm)。从图2可见,参数 (KF/PI_a) 在半干旱半湿润地区一般小于1.6。因此,式(6)中的函数 $f(x) = \ln(1+x)$ 能够被近似为 $f(x) \approx \beta (0 \leq x < 1.6)$ 。如果已知 x 的最大值 $x_{\max}$, 系数 β 可以通过如下最小二乘法拟合公式来计算:

$$\beta = \frac{\int_0^{x_{\max}} x \ln(1+x) dx}{\int_0^{x_{\max}} x^2 dx} = \frac{3}{2} \frac{x_{\max}^2 - 1}{x_{\max}^3} \ln(1+x_{\max}) - \frac{3}{4} \frac{x_{\max} - 2}{x_{\max}^2} \quad (19)$$

利用式(19), GAF 模型的隐式解析解可简化为

$$t \approx \frac{F}{K} + I_a \frac{K - P}{K^2} \left(\beta \frac{K}{PI_a} F \right) \quad (20)$$

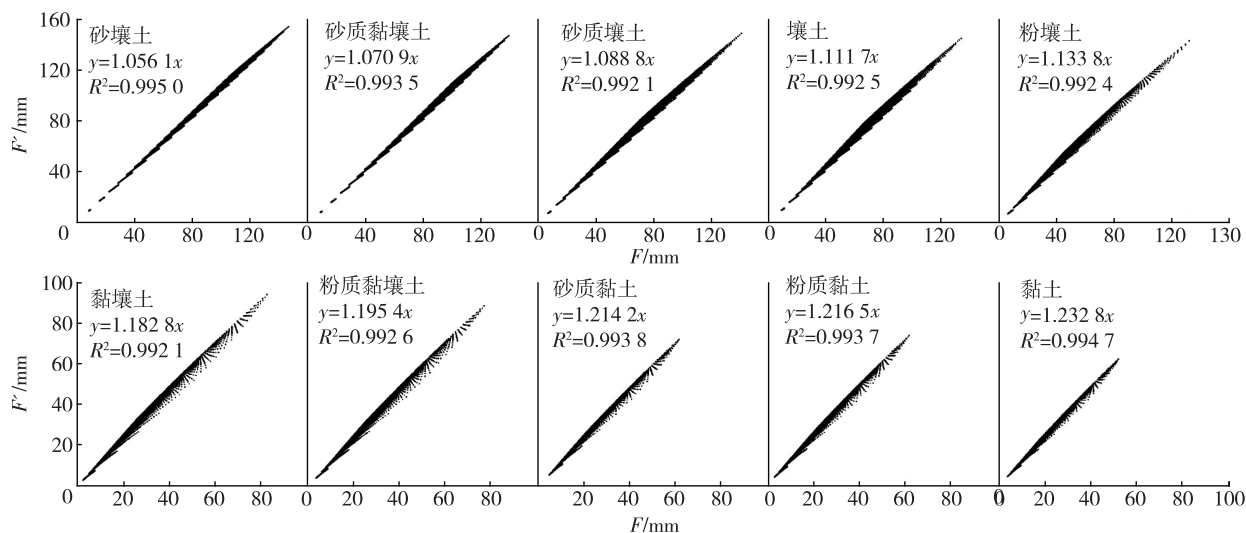


图3 降雨累积损失的 GAF 模型解析解与近似解比较

Fig. 3 Comparison between analytical solution of GAF model and approximate solution of accumulated rainfall loss

图3显示降雨累积损失的 GAF 模型解析解 F 与近似解 F' ($F' \approx f(\beta)$) 有很好的线性关系,总降雨量 $P_t = (0, 200]$ mm, 雨强 $P = (0, 100]$ mm/h, $t \leq 10$ h, 并且 $P_t + I_a \leq 200$ mm。为此,在式(20)中增加一个新系数 A ,即

$$\frac{t}{A} \approx \frac{F}{K} + I_a \frac{K - P}{K^2} \left(\beta \frac{K}{PI_a} F \right) \quad (21)$$

式(21)是 GAF 模型解析解的最优近似公式。同时,利用图3 相应的线性拟合系数和对应的土壤饱和导

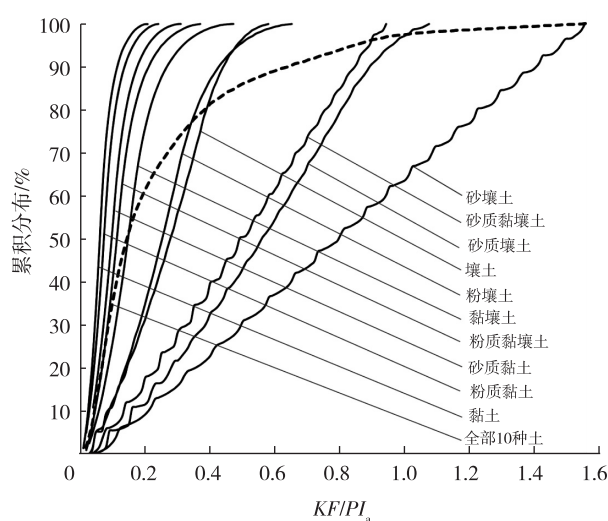


图2 10种土壤质地的参数 (KF/PI_a) 取值分布

Fig. 2 Parameter (KF/PI_a) distribution of ten different soil types

水率,发现系数 A 与土壤饱和导水率间存在密切的幂指数关系: $A=0.824K^{0.034}$ 。整理式(21)可得

$$\frac{1}{F(t)} \approx \frac{A\beta}{Pt} + \frac{A(1-\beta)}{Kt} \quad (22)$$

对式(22),当设置 $A\beta \approx 1$ 和 $(A-A\beta)/(Kt) \approx 1/S$ 时(S 为可能最大滞留量),式(22)正是 SCS-CN 模型比例相等假设的变形:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{P - I_a} + \frac{1}{S} \quad (23)$$

因此,SCS-CN 模型是 GAF 模型的过渡简化近似,这再次揭示了 SCS-CN 模型比例相等假设的物理机制。而式(22)通过引入 2 个新参数 A 和 β 修正了 SCS-CN 模型比例相等假设。表 2 表明,通过这种修正,可以显著减小 SCS-CN 模型的误差,使平均相对误差小于 1%。

对 SCS-CN 模型的修正,具体表现在以下几个方面:

a. 通过引入 2 个新参数 A 和 β ,修正 SCS-CN 模型比例相等假设为

$$\frac{Q + (1 - A\beta)F}{P' - I_a} = \frac{F}{S} \quad (24)$$

式中: P' —SCS-CN 模型的累积降雨量。

表 2 不同土壤质地 GAF 模型解析解与近似解对比

Table 2 Comparison between analytical solution of GAF model and approximate solution of parameters of ten different soil types

序号	土壤质地	有效孔隙*/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	泡点压力*/ cm	孔隙分布*	$K_s^*/$ ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	GAF 近似		
						β 均值	A	平均误差/%
1	砂壤土	0.401	8.69	0.553	61.1	0.799	0.9469	0.16
2	砂质黏壤土	0.412	14.66	0.378	43.0	0.858	0.9338	0.26
3	砂质壤土	0.434	11.15	0.252	25.9	0.845	0.9184	0.15
4	壤土	0.486	20.76	0.234	13.2	0.911	0.8995	0.08
5	粉壤土	0.330	28.08	0.319	6.8	0.916	0.8820	0.75
6	黏壤土	0.390	25.89	0.242	2.3	0.945	0.8455	0.76
7	粉质黏壤土	0.432	32.56	0.177	1.5	0.962	0.8365	0.59
8	砂质黏土	0.321	29.17	0.223	1.2	0.956	0.8236	0.67
9	粉质黏土	0.423	34.19	0.150	0.9	0.970	0.8220	0.53
10	黏土	0.385	37.30	0.165	0.6	0.975	0.8112	0.50

注: * 数据来源于文献[12-13]。

b. SCS-CN 模型的径流计算公式被修正为

$$Q = (P' - \lambda S) \frac{(P' - \lambda S) + (A\beta - 1)S}{(P' - \lambda S) + A\beta S} \quad (25)$$

式中: λ ——降雨初损系数,是一个区域参数。

c. 对比式(22)和(23),可以给出 SCS-CN 模型中 S 的公式:

$$S = \frac{Kt}{A(1 - \beta)} \quad (26)$$

式(26)也表明,对于一定的总降雨量,参数 S 与降雨历时的关系。

d. 参数 β 可以通过传统的 CN 值来评估,也可以利用土壤质地类型从表 2 查询得到,但在实际使用时最好利用历史水文序列数据,通过参数率定获到。

表 2 显示,通过引入 2 个新参数 A 和 β ,修正的 SCS-CN 模型可以显著减小传统 SCS-CN 模型的误差,使平均相对误差小于 1%。

5 结 语

HIMS 是中国科学院地理科学与资源研究所自主研发的水循环综合模拟系统,在研发过程中,笔者长期

重视降雨产流理论的研究。在 LCM 暴雨损失经验模型的着眼产流期内降雨损失的思想,以物理机制清晰的 Green-Ampt 模型为基础,通过引入降雨初损量作为一个基本参数,建立了新的产流期降雨损失方程(GAF 模型)。通过 GAF 模型可以直接推导出 LCM 模型,揭示了 LCM 模型的物理基础是 GAF 模型产流期内降雨累积损失量公式的幂指数近似,对 10 种不同质地土壤模拟的最大相对误差不超过 8%,平均相对误差小于 4%,误差的大小与土壤质地相关。从理论上证明了 LCM 模型是产流期内降雨累积损失量计算的高精度方法;而且 GAF 模型也可以直接推导出 SCS-CN 模型,揭示了 SCS-CN 模型是 GAF 模型的倒数线性近似解的简化版,与 GAF 模型解析解偏差很大。过渡的简化是导致 SCS-CN 模型模拟精度过低的原因;通过对 GAF 模型解析解的深入分析,提出了修正的 SCS-CN 模型,使之包含雨强的影响,修正的 SCS-CN 模型可以显著减小传统 SCS-CN 模型的误差,使平均相对误差小于 1%。HIMS 产流模型的发展推动了对半湿润半干旱地区超渗产流机制的研究,但其本身还需要不断发展和完善。

参考文献:

- [1] 刘昌明,王中根,杨胜天,等.地表物质能量交换过程中的水循环综合模拟系统(HIMS)研究进展[J].地理学报,2014,69(5):579-587.(LIU Changming, WANG Zhonggen, YANG Shengtian, et al. Hydro-informatic modeling system: aiming at water cycle in land surface material and energy exchange processes[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(5): 579-587. (in Chinese))
- [2] KIRKBY M J. 山坡水文学[M].刘新仁,王炳程,译.哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1989.
- [3] SINGH V P. Computer models of watershed hydrology[M]. Highlands Ranch: Water Resources Publications, 1996.
- [4] 董小涛,李致家,李利琴.不同水文模型在半干旱地区的应用比较研究[J].河海大学学报:自然科学版,2006,34(2):132-135. (DONG Xiaotao, LI Zhijia, LI Liqin. Application and comparison of three hydrological models in semi-arid region[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2006, 34(2): 132-135. (in Chinese))
- [5] LIU Changming, WANG Deguang. The estimation of small-watershed peak flows in China[J]. Water Resources Research, 1980, 16(5): 881-886.
- [6] 刘昌明,王中根,郑红星,等. HIMS 系统及其定制模型的开发与应用[J]. 中国科学:E 辑, 2008, 38(3): 350-360. (LIU Changming, WANG Zhonggen, ZHENG Hongxing, et al. Application study of HIMS system and custom model[J]. Chinese Science: Series E, 2008, 38(3): 350-360. (in Chinese))
- [7] 李军.半干旱半湿润地区产汇流过程机理研究[D].北京:中国科学院地理科学与资源研究所, 2015.
- [8] LI Jun, LIU Changming, WANG Zhonggen, et al. Two universal runoff yield models: SCS vs. LCM[J]. Journal of Geographical Sciences, 2015, 25(3): 311-318.
- [9] 李军,刘昌明,王中根,等. 现行普适降水入渗产流模型比较研究:SCS 与 LCM[J].地理学报, 2014, 69(7): 926-932. (LI Jun, LIU Changming, WANG Zhonggen, et al. Two universal runoff yield models: SCS vs. LCM[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(7): 926-932. (in Chinese))
- [10] LI Jun, WANG Zhonggen, LIU Changming. A combined rainfall infiltration model based on green-ampt and SCS-curve number [J]. Hydrol Process, 2015, 29: 2628-2634.
- [11] LAMBERT J H. Observationes variae in mathesin puram[J]. Acta Helveticae Physico Mathematico Anatomico Botanico Medica, Band III, 1758:128-168.
- [12] RAVI V, WILLIAMS J R, BURDEN D S. Estimation of infiltration rate in the vadose zone: compilation of simple mathematical models[R]. Washington, DC: US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, 1998.
- [13] RAWLS W J, AHUJA L R, BRAKENSIEK D L, et al. Infiltration and soil water movement[M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1992.
- [14] MAIDMENT D R. Handbook of hydrology[M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1992.
- [15] HAWKINS R H. Asymptotic determination of runoff curve numbers from data[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 1993, 119:334-345.
- [16] MCCUEN R H. Approach to confidence interval estimation for curve numbers [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2002, 7:43-48.
- [17] PONCE V M, HAWKINS R H. Runoff curve number: has it reached maturity[J]. Hydrologic Engineering, ASCE, 1996, 1(1): 11-19.