

SCS 模型在红壤土坡地降雨径流量估算中的应用

张卫^{1,2}, 张展羽³, 杨洁⁴

(1. 水利水资源安徽省重点实验室, 安徽 蚌埠 233000; 2. 安徽省(水利部淮河水利委员会)水利科学研究院, 安徽 蚌埠 233000;
3. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 4. 江西省水土保持科学研究所, 江西 南昌 330000)

摘要: 由于地区间的 CN 参数差异很大, 导致运用 SCS 模型计算降雨径流时不同使用主体的主观性太强。为了获得适合红壤地区的 CN 参数, 利用江西省德安县燕家沟流域观测小区 2001—2003 年的降雨径流资料反算 CN。然后通过 SPSS 软件对降雨量与 CN 参数进行回归模拟, 得到不同小区的 CN 模拟函数。最后利用 2004 年的降雨径流数据对模拟结果进行检验, 得到了可信度较高的结果, 同时说明了 SCS 模型估算红壤土流域径流量的可行性。

关键词: SCS 模型; 降雨量; 径流量; CN

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2014)05-0124-04

中图分类号: S157

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2014.05.030

Application of SCS Model to Estimate Volume of Runoff in Slope Field of Red Soil

ZHANG Wei^{1,2}, ZHANG Zhan-yu³, YANG Jie⁴

(1. Key Laboratory of Water Conservancy and Water Resources of Anhui Province, Bengbu, Anhui, 233000, China; 2. Water Resources Research Institute of Anhui Province and Huaihe River Commission, Ministry of Water Resources, Bengbu, Anhui 233000, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 4. Soil and Water Conservation Research Institute of Jiangxi Province, Nanchang, Jiangxi 330000, China)

Abstract: It is subjective to calculate the runoff from rainfall by soil conservation service(SCS) model due to the large differences of CN parameter among regions. In attempt to get the particularly suitable CN parameter for the red soil region, the CN parameter was calculated based on runoff and rainfall data from the observation plots of Yanjiagou watershed in De'an County of Jiangxi Province during 2001—2003. The regression analysis between rainfall and CN parameter produced the CN simulation functions for different runoff plots. The result indicated that the reliability of CN simulation functions of different runoff plots were very well. Meanwhile, it also showed the feasibility of the application of SCS model in estimating runoff volume in slope field of red soil.

Keywords: SCS model; rainfall; runoff; CN

SCS 模型是美国农业部水土保持局 (Soil Conservation Service, SCS) 于 1954 年开发研制的流域水文模型^[1], 被广泛应用于美国及其他国家, 其有效性已在诸多学者的研究中予以证明, 如 Harbor^[2], Grove 等^[3] 的研究。

与其他模型相比, SCS 模型被广泛移植应用的显著特点和优点是 SCS 模型将诸多环境因素的影响和贡献归结为一个空间参量即 CN 值, 模型结构简化, 参数少, 模型率定相对容易实现^[4-5]。但由于中国和美国之间在气候、土壤、土地利用方式等多方面存在很大差异, 而 CN 参数又是反映流域下垫面特征的参

数, 所以直接应用美国测定的 CN 值, 不太适合国内的情况^[6]。在中国对 SCS 的研究主要针对不同研究区域的分析^[7], 主要集中于北京及黄土高原等地区, 而关于红壤土坡地 CN 参数的研究很少。南方红壤区由于山地丘陵交错、地形起伏大、雨量多而集中、暴雨强度大、植被破坏严重等特殊的环境条件, 亟需将 SCS 径流估算模型运用到红壤区。

因此, 本文通过研究 SCS 模型在红壤土坡地径流估算中的运用, 尝试探讨适合红壤土流域的合理 CN 参数, 以为农田非点源污染物输出的模拟以及水土资源的合理利用提供有重要价值的参考^[8]。

收稿日期: 2013-12-13

修回日期: 2014-01-22

作者简介: 张卫(1987—), 男(汉族), 安徽省含山县人, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事农田水利与水土保持研究。E-mail: 515621835@qq.com。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

试验地布设在江西水土保持生态科技园。该园地处江西省北部鄱阳湖水系的九江市德安县城郊燕沟小流域,位于东经 $115^{\circ}42'38''-115^{\circ}43'06''$,北纬 $29^{\circ}16'37''-29^{\circ}17'40''$ 。属亚热带季风气候区,具有气候温和,雨量充沛,光照充足,四季分明的特点。年平均降雨量 $1\,451.8\text{ mm}$,因受季风气候影响而在季节分配上极不均匀,形成明显的干季和湿季,7—9 月高温少雨。最大年降雨量为 $1\,807.7\text{ mm}$,最小年降雨量为 865.6 mm ,年降雨一般呈双峰曲线。多年平均气温 $16.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,冬季最低气温零下 $11\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均气温 $4.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,夏季最高气温一般不超过 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均气温 $28.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。年日照时数 $1\,650\sim 2\,100\text{ h}$,多年平均无霜期为 249 d ^[9]。其地层为元古界板溪群泥质岩、新生界第四纪红色黏土、近代冲积与残积物。地貌类型为浅丘岗地,海拔高度一般在 $30\sim 100\text{ m}$,坡度多在 $5^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 。土壤成土母质主要是第四纪红黏土,泥质岩类风化物。土质类型主要为中壤土、重壤土和轻黏土。

1.2 试验处理

本研究设 4 个小区包括:(I)百喜草全园覆盖,种有柑橘树(多年生),常年复种指数为 1.20 (柑橘 0.20 ,百喜草 1.0),植被覆盖度 100% 。(II)百喜草带状覆盖,间种黄豆,植被覆盖度 $70\%\sim 85\%$ (其中百喜草 50% ,柑橘 20% ,黄豆 15%);(III)全园裸露区,植被覆盖度 0% 。(IV)标准水平梯田,梯壁植百喜草,梯面种柑橘+百喜草,植被覆盖度 100% 。

本次试验从 2001—2004 年进行了 4 a 的降雨径流观测,所选小区的土地利用类型为江西红壤区具有代表性的土地利用方式。小区坡度均为 12° ,面积 $20\text{ m}\times 5\text{ m}$,每个小区出水口建有径流池,每个径流池配有自记水位计,能全天候记录径流动态。

1.3 SCS 模型的建立

SCS 模型是基于集水区的实际入渗量(F)与实际径流量(Q)之比等于集水区该场降雨前的潜在入渗量(S)与潜在径流量(Q_m)之比的假定基础上建立的,即:

$$\frac{F}{Q} = \frac{S}{Q_m} \quad (1)$$

式中: F ——集水区的实际入渗量(mm); Q ——实际径流量(mm); S ——降雨前的潜在入渗量(mm); Q_m ——潜在径流量(mm)。下同。

假定潜在径流量为降雨量 P 与由径流产生前植物截流、初渗和填注蓄水构成集水区初损量 I_a 的差值,即:

$$Q_m = P - I_a \quad (2)$$

式中: P ——降雨量(mm); I_a ——初损量(mm)。

实际入渗量为降雨量减去初损和径流量,即:

$$F = P - I_a - Q \quad (3)$$

由(1),(2),(3)式可得出:

$$\begin{cases} Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} & (P \geq I_a) \\ Q = 0 & (P < I_a) \end{cases} \quad (4)$$

美国农业部土壤保持局在分析了大量的长期实验结果基础上二者最合适的比例系数为 0.2 ,即 $I_a = 0.2S$,所以,最后的修正公式即^[10]:

$$\begin{cases} Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} & (P \geq 0.2S) \\ Q = 0 & (P < 0.2S) \end{cases} \quad (5)$$

由此可以看出:集水区的径流量取决于降雨量与该场降雨前集水区的潜在入渗量,而潜在入渗量又与集水区的土壤质地、土地利用方式和降雨前的土壤湿度状况有关,SCS 模型通过一个经验性的综合反映上述因素的参数 CN 来推求 S 值:

$$S = \frac{25\,400}{\text{CN}} - 254 \quad (6)$$

由公式(5)可以看出,欲求径流量,只需知道参数 CN。在实际条件下,CN 值在 $30\sim 100$ 变化。根据土壤特性,将土壤划分为 A,B,C,D 这 4 种类型,根据 CN 值表可以查得不同土地利用条件下,不同土壤类型的 CN 值。然后将土壤湿润状况根据径流事件发生前 5 d 的降雨总量(即前期降雨指数 API)划分为湿润、中等湿润和干旱 3 种状态,再调节由查表获得 CN 值。

2 结果与讨论

SCS 模型之所以得到广泛应用,最大特点是结构简单,参数少,应用方便,但在中国直接应用误差太大。因此,必须要对该模型进行修正。目前主要的改进方法一是重新率定 CN 值,二是直接确定初损和流域当时可能的滞留量^[11]。许多学者对此进行了研究,例如高扬等^[12]通过对紫色土坡地降雨产生径流的观测,通过校正 I_a 和 CN 参数,运用 SCS 模型计算试验小区在 2005 年的 3 场降雨产生的径流量,小区径流量计算值和实测值的误差分别为: 6.46% , 10.22% 和 8.40% ,得到了可信度较高的结果,说明了 SCS 模型在估算紫色土流域径流量的可行性。张钰娴等^[13]在对径流曲线数模型参数 λ 敏感性分析的基础上,应用黄土丘陵区径流场 62 场实测降雨资料对参数 λ 与地表坡度关系进行了定量分析,结果表

明,曲线数模型所描述的参数 $\lambda=0.2$ 适合于黄土丘陵缓坡地,参数 λ 随着坡度的增大而减小;同时用实测降雨资料进行标定模型验证,得出径流量的预测值与实测值接近,其效率系数 $E=0.94$,与直接运用模型计算径流量比较,效率系数有较显著提高。

本文通过利用研究区已有的降雨径流资料,来重新率定 CN 值。

根据公式(5)和(6)式,进行反算可以得到两个值 CN_1 和 CN_2 :

$$CN_1 = \frac{B - \sqrt{(B^2 - 4AC)}}{2A} \quad (7)$$

$$CN_2 = \frac{B + \sqrt{(B^2 - 4AC)}}{2A} \quad (8)$$

式中: $A = (5P + 254)^2 - Q(25P - 5080)$

$$B = 50800(5P + 254) + 508000Q;$$

$$C = 645160000.$$

运用 2001—2003 年总计 98 次降雨径流事件,根据公式(7)和(8)按照不同土地利用方式反算 CN。通过 SPSS 统计分析发现不同土地利用方式下的 CN 值与其同次降雨量 P 存在显著的相关性(表 1)。由表 1 可以看出,相关系数基本都在 0.9 左右。进一步利用 SPSS 对降雨量和 CN 进行回归分析,得到不同土地利用类型下的 CN 函数(表 2)。

从表 2 可以看出,利用降雨量模拟得到的 CN 二次和三次函数具有很高的可信度。根据 2004 年 17 场降雨径流数据,运用原 SCS 模型和回归分析得到的 CN 模拟函数来计算模拟各小区的径流量,模拟结果如图 1—4 所示。

表 1 CN 计算值与降雨量的相关性分析

项目	I		II		III		IV	
	CN ₁	CN ₂	CN ₁	CN ₂	CN ₁	CN ₂	CN ₁	CN ₂
P	-0.923**	-0.934**	-0.922**	-0.917**	-0.826**	-0.819**	-0.919**	-0.931**

注: ** 为在 0.01 水平上显著相关。

表 2 降雨量与 CN 的回归分析

小区	CN	函数	Rsq.	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃
I	CN ₁	Cubic	0.991	94.884	-1.564	0.013	-0.00004387
II	CN ₁	Cubic	0.976	92.080	-1.370	0.010	-0.00002900
III	CN ₁	Quadratic	0.846	87.219	-1.592	0.008	—
IV	CN ₁	Cubic	0.990	96.429	-1.836	0.018	-0.00006511

注:二次函数形式: $CN = b_0 + b_1 * P + b_2 * P^2$;三次函数形式: $CN = b_0 + b_1 * P + b_2 * P^2 + b_3 * P^3$; Rsq. 表示回归直线的精度高低的指标,称为总判定系数。

由图 1—4 可知,相比于原模型模拟值,利用改进 CN 函数对各小区的径流量模拟效果更好,模拟值变化趋势与实测值基本一致。通过相关分析发现, I 小区利用 CN₁ 三次函数和原模型模拟 17 次降雨得到的径流量与实测径流量的相关系数分别为 88.1%, 53.3%; II 小区利用 CN₁ 三次函数和原模型模拟 17

次降雨得到的径流量与实测径流量的相关系数分别为 86.6%, 38.4%; III 小区利用 CN₁ 二次函数和原模型模拟 17 次降雨得到的径流量与实测径流量的相关系数分别为 96.7%, 60.0%; IV 小区利用 CN₁ 三次函数和原模型模拟 17 次降雨得到的径流量与实测径流量的相关系数分别为 91.8%, 85.7%。

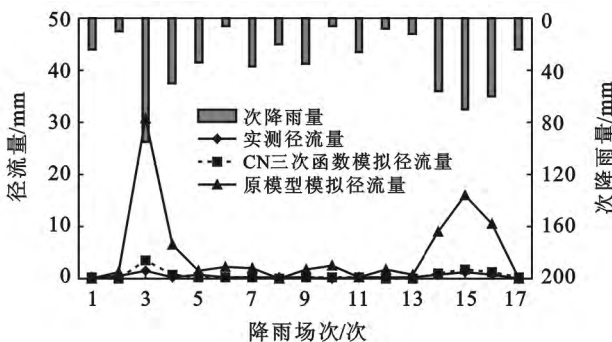


图 1 I 小区实测径流量和模拟径流量对比

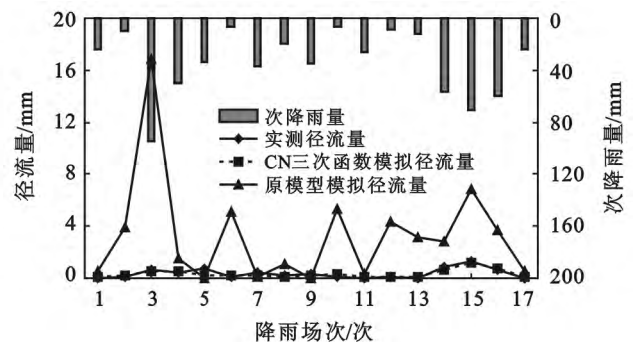


图 2 II 小区实测径流量和模拟径流量对比

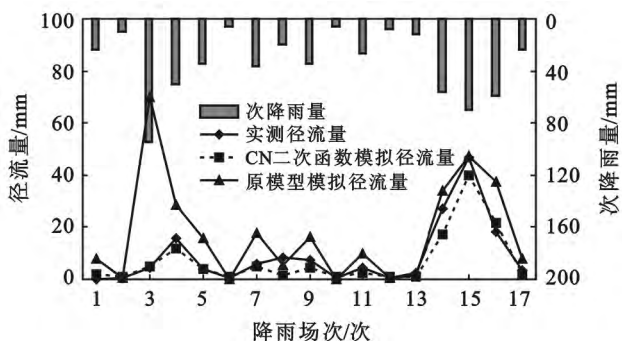


图 3 III 小区实测径流量和模拟径流量对比

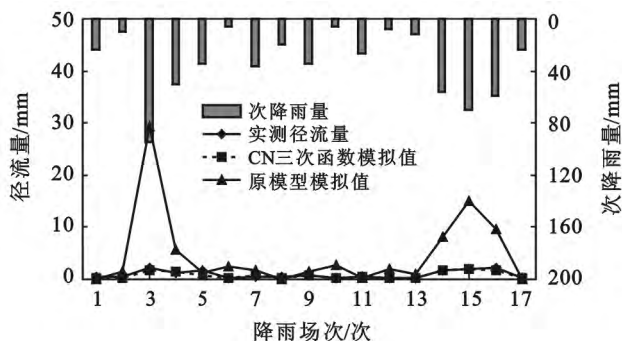


图 4 IV 小区实测径流量与模拟径流量对比

综上所述,与原模型相比,采用 CN 函数模拟红壤土坡地降雨径流的精度较高,但是当降雨量很高时,其模拟精度会变低,特别是原模型模拟精度显著降低,主要原因可能是高降雨量事件往往是暴雨,产流过程比较复杂。这与张秀英等^[11]在黄土丘陵区的研究结果是一致的。

3 结论

(1) 在红壤土坡地直接应用 SCS 模型计算次降雨条件下的地表径流量,尤其是在降雨量较大时,误差较大,过高的预测了径流量。

(2) 本文通过降雨量反算 CN,利用得到的 CN 与降雨量的回归函数模拟径流量,得到了可信度较高的结果,为红壤土坡地径流模拟计算提供了一定的参考。

(3) 限于试验条件限制,本文仅探讨了 4 种不同土地利用方式下的 CN 函数,今后应该对该流域更多其他土地利用方式的 CN 参数进行研究,以便进一步找出规律。

[参 考 文 献]

[1] Mockus V. National Engineering Handbook[S]. Hydrology, section 4, Soil Conservation Service, US Department of Agriculture, Washington, DC, 1964.
 [2] Hobor J. A practical method for estimating the impact of land use change on surface runoff, groundwater recharge and wetland hydrology[J]. Journal of American Planning Association, 1994,60(1):91-104.
 [3] Grove M, Horbor J, Engel B. Composite versus distrib-

uted curve numbers: Effects on estimates of storm runoff depths[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1998,34(5):1015-1023.
 [4] 李常斌,秦将为,李金标. 计算 CN 值及其在黄土高原典型流域降雨—模型模拟中的应用[J]. 干旱区资源与环境,2008,22(7):67-70.
 [5] Mishra S K, Tyagi J V, Singh V P, et al. SCS—CN-based modeling of sediment yield[J]. Journal of Hydrology, 2006,324(1/4):301-322.
 [6] 魏文秋,谢淑秦. 遥感资料在 SCS 模型产流计算中的应用[J]. 环境遥感,1992,7(4):243-250.
 [7] 刘家福,蒋卫国,占文凤,等. SCS 模型及其研究进展[J]. 水土保持研究,2009,17(2):120-124.
 [8] 贺宝根,周乃晟. 农田非点源污染研究中的降雨径流关系:SCS 法的修正[J]. 环境科学研究,2001,14(3):49-51.
 [9] 李新虎,张展羽,杨洁,等. 红壤坡地不同生态措施地下径流养分流失研究[J]. 水资源与水工程学报,2010,21(2):83-86.
 [10] 罗利芳,张科利. 径流曲线数法在黄土高原地表径流量计算中的应用[J]. 水土保持通报,2002,22(3):58-61.
 [11] 张秀英,孟飞,丁宁. SCS 模型在干旱半干旱区小流域径流估算中的应用[J]. 水土保持研究,2003,10(4):172-175.
 [12] 高扬,朱波,缪驰远,等. SCS 模型在紫色土坡地降雨径流量估算中的运用[J]. 中国农学通报,2006,22(11):396-400.
 [13] 张钰嫻,穆兴民,王飞. 径流曲线数模型(SCS—CN)参数 λ 在黄土丘陵区的率定[J]. 干旱地区农业研究,2008,26(5):124-128.