

SCS 模型在贵州省毕节市石桥小流域 坡面产流模拟中的应用

张兴奇, 徐鹏程, 顾璟冉

(南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023)

摘要: [目的] 研究喀斯特地区径流形成规律, 得到适合研究区的 SCS(space cooperation system)模型参数取值。[方法] 利用野外径流小区观测获得的径流数据与降雨资料, 对研究区的降雨进行雨型分类, 并利用 SCS 模型进行坡面产流模拟。[结果] (1) 根据降雨随历时的分配可将研究区的降雨雨型分为 4 类, 即前期型(I 类)、中期型(II 类)、后期型(III 类)以及均匀型(IV 类)。(2) 基于 SCS 模型对研究区坡面径流进行模拟时, 初损系数 λ 取值多为 0.01, 0.05, 远小于 $\lambda=0.2$ 的取值。(3) 随着坡长的增加, 前期型降雨、中间型降雨和后期型降雨的 CN(curve number)值变幅较小, 均匀型降雨的 CN 值呈现增加的趋势。随着坡度的增加, 前期型降雨和中期型降雨的 CN 值呈现减少的趋势, 后期型降雨和均匀型降雨的 CN 值增幅不大。[结论] 基于 SCS 模型得到的模拟径流量与实测径流量之间的相关系数和模型效率系数都较高, 具有较好的模拟效果。

关键词: 降雨雨型; SCS 模型; 径流模拟; 贵州

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2017)03-0321-08

中图分类号: S273.1, S157.1

文献参数: 张兴奇, 徐鹏程, 顾璟冉. SCS 模型在贵州省毕节市石桥小流域坡面产流模拟中的应用[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3): 321-328. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.055; Zhang Xingqi, Xu Pengcheng, Gu Jingran. Application of SCS model to simulate runoff in slope field at Shiqiao small watershed in Bijie City of Guizhou Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(3): 321-328. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.055

Application of SCS Model to Simulate Runoff in Slope Field at Shiqiao Small Watershed in Bijie City of Guizhou Province

ZHANG Xingqi, XU Pengcheng, GU Jingran

(School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China)

Abstract: [Objective] The rule of runoff formation in karst area was studied to get the parameters of space cooperation system(SCS) model and to test whether it is applicable in the study area. [Methods] Based on field observations of runoff and rainfall characteristics, rainfall events in the study area were classified. Runoff generated on the slopes was simulated by using the SCS model. [Results] (1) Rainfall events in the study area can be divided into four types according to event-based rainfall concentration, namely the pre-type(type I), medium-type(type II), back-type(type III) and even-type(type IV). (2) The value of the initial loss coefficient(λ) was 0.01 or 0.05, much less than 0.2, when simulating runoff on the slopes in the study area by using the SCS model. (3) The curve number(CN) values of type I, type II and type III rainfall showed small changes as slope length increased, while the CN value of type IV rainfall tended to increase. The CN values of type I and type II rainfalls tended to reduce with the increase of slope gradient, the CN values of type III and type IV rainfall did not increase obviously with the increase in slope gradient. [Conclusion] Based on SCS model, the correlation coefficient and model efficiency coefficient of simulated runoff and observed runoff are both high, which indicates the model performed well.

Keywords: rainfall type; SCS model; runoff simulation; Guizhou Province

收稿日期: 2016-07-15

修回日期: 2016-11-24

资助项目: 贵州省水利厅重点科研项目“贵州喀斯特地区土壤侵蚀机理研究”(KJZD200801), “贵州喀斯特地区坡耕地坡度、坡长与水土流失关系研究”(KT201007), “西南喀斯特地区土壤侵蚀机理及水土流失预测”(2006200); 国家自然科学基金资助项目“喀斯特地区人类活动主导下的生态环境变化与流域水文循环响应耦合机理研究”(41371045); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

第一作者: 张兴奇(1964—), 男(汉族), 贵州省仁怀市人, 博士, 副教授, 主要从事水资源与水土保持研究。E-mail: zxqrh@nju.edu.cn.

降雨产流是引起土壤侵蚀的主要原因之一,定量地计算降雨径流量,对于认识土壤侵蚀发生规律有着重要意义。贵州喀斯特地貌发育,成土速度慢,土层浅薄,山高坡陡^[1],加之降雨的时空分布不均等特点,导致该区成为土壤侵蚀最严重的地区之一。因此在该地区采取有效的水土流失防治措施迫在眉睫,这就需要对该地区的径流形成规律进行研究。

SCS 模型最早是美国农业部水土保持局对流域上发生的水文过程进行模拟建立的数学经验模型,具有结构简单、参数少和广泛使用等优点。目前。国内外学者对 SCS 模型开展了广泛的研究:Ponce 等^[2]论证得到 λ 具有区域性,其取值的合理性需进一步研究。周淑梅等^[3]利用 1987—2006 年 14 场降雨事件确定了最适合黄土丘陵沟壑区的初损值为 0.1。王红雷等^[4]研究表明坡度坡长对坡面产汇流有重要影响,坡度坡长是 CN 值的影响因子。王兴鹏等^[5]发现从理论上讲,CN 取值介于 0~100,但在实际条件下,CN 值在 30~100 变化。王英等^[6]优化出了黄土高原地区 3 种土地利用方式的 λ 值,但模型模拟效率还是不高,所以提出降雨强度修正函数,将降雨强度因子引入 SCS 模型中。

本文基于 SCS 模型的基本原理和应用流程,利用贵州省毕节市试验小区 2012—2014 年的 51 场降雨资料,通过对 SCS 模型进行参数修正(主要是初损系数、CN 值和降雨的修正等),计算在不同的参数水平下的降雨径流量,将模拟值与实测值相比较,探讨该方法的合理参数和模型的有效性。

1 研究区概况

1.1 研究区自然环境概况

研究区位于贵州省毕节市鸭池镇石桥小流域,属长江水系乌江流域上段六冲河的 3 级支流区,流域面积 8.19 km²;海拔高度 1 400~1 743 m,地势起伏大,相对高差为 343 m;属亚热带湿润季风气候,年均降雨量 863 mm,降雨主要分布在 5—9 月,年均气温 14 ℃。小流域内碳酸盐类石灰岩广泛分布,平均裸岩率达 30%,植被覆盖率低,是贵州省境内具有代表性的喀斯特石漠化地区。

1.2 径流小区布设

径流小区布设在石桥小流域,共布设了 5 个坡长小区、5 个坡度小区和 2 个标准小区,小区基本情况见表 1。

表 1 贵州省毕节市小流域径流小区基本情况

小区类型	投影坡长/ m	宽度/ m	水平面积/ m ²	场地特征				
				坡度	坡向	坡位	土层厚度/cm	基岩种类
坡度	10	2.5	25	15	南偏西 45°	下坡	28	石灰岩
坡度	10	2.5	25	10	南偏西 45°	下坡	30	石灰岩
坡度	10	2.5	25	5	南偏西 45°	下坡	25	石灰岩
标准	20	5	100	5	南偏西 45°	中坡	35	石灰岩
标准	20	5	100	5	南偏西 45°	中坡	35	石灰岩
坡度	10	2.5	25	20	南偏西 45°	下坡	23	石灰岩
坡度	10	2.5	25	25	南偏西 45°	下坡	23	石灰岩
坡长	25	2.5	62.5	15	北偏西 25°	下坡	21	石灰岩
坡长	20	2.5	50	15	北偏西 25°	下坡	21	石灰岩
坡长	15	2.5	37.5	15	北偏西 25°	下坡	21	石灰岩
坡长	10	2.5	25	15	北偏西 25°	下坡	21	石灰岩
坡长	5	2.5	12.5	15	北偏西 25°	下坡	21	石灰岩

1.3 试验方法

试验数据来自 12 个径流小区 2012—2014 年 51 次侵蚀性降雨野外观测记录以及室内分析结果。降雨产流产沙后第 1 时间实地观测取样,观测集流池、分流池内的水深,用以计算坡面径流深:

$$Q=10^3 V/S \quad (1)$$

$$V=S_1 Q_1+r S_2 Q_2 \quad (2)$$

式中: Q ——坡面径流深(mm); V ——坡面总产流体积(m³); S ——野外径流小区面积(m²); S_1 ——集流

池池底面积(m²); S_2 ——一级分流池池底面积(m²); Q_1 ——集流池水深(m); Q_2 ——一级分流池水深(m); r ——一级分流系数。

2 研究区降雨雨型分类

降雨雨型是指研究次降雨过程中降雨量的集中程度,其反应了降雨过程中降雨量随历时的分配^[7]。选取 2012—2014 年研究区逐分钟降雨过程的自记雨量记录纸,经过数字化后整理得到次降雨的总降雨历

时(T)、累积降雨历时($t, 0 \leq t \leq T$)、总降雨量(P)和累积降雨量($P_t, 10 \leq P_t \leq P$)。以累积降雨历时与总历时的比值作为横坐标,累积降雨量与总降雨量的比值作为纵坐标,用 Origin 软件对得到的次降雨量纲标准化后的数据进行曲线拟合,得到拟合的降雨过程曲线,即标准化降雨历时—降雨量曲线。在 SPSS 软件中运用 K 均值分类法按照降雨量值之间的距离进行简单分类,将研究区 51 次降雨聚为 6 类降雨事件,6 类降雨事件占总降雨场次的比例分别为:4%,10%,27%,10%,35%,14%。其中 3,6 类降雨事件占 41%,1,2 类降雨事件占较小的比例。

对按照降雨特征值分类的 6 种降雨类型再按照

雨型曲线的凹凸特征归类为 4 大类,得到:3,6 类降雨归为 I,4,5 类归为 II,1,2 类归为 III,部分 5 类归为 IV,4 大类降雨事件分别占总降雨次数的 41%,27%,14%和 18%。将标准化后的总降雨历时以 0.2 为间隔分为 5 等份,绘制图 1。I 类雨型降雨历时—降雨量曲线呈现上凸,先陡后缓,这类降雨类型称为降雨前期集中型。II 类雨型曲线呈现两端平缓,中间陡峭的线型,这类降雨称为降雨中期集中型;III 类雨型曲线是下凹型,前期上升较缓,后期上升较快,这类降雨称为降雨后期集中型;IV 类雨型曲线趋于直线,全段降雨量增长均匀平缓,这类降雨称为降雨均匀分布型。

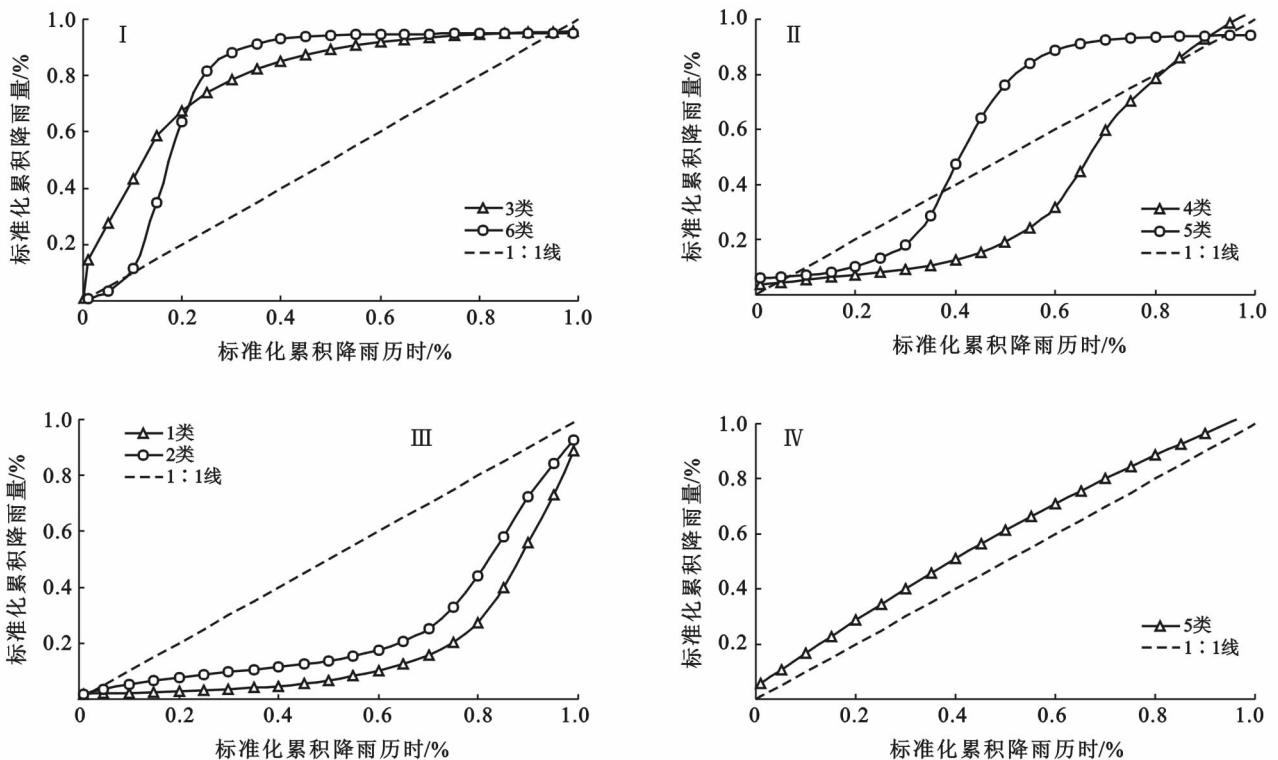


图 1 贵州省毕节市小流域 4 类标准化降雨历时与降雨量关系

3 径流曲线数模型(SCS-CN)简介与评价

3.1 模型介绍

径流曲线数模型(SCS-CN)假定地面径流量与潜在径流量之比等于流域实际入渗量和最大入渗量之比,即:

$$\frac{Q}{P - I_a} = \frac{F}{S} \quad (3)$$

式中: F ——流域实际入渗量(mm); S ——流域最大入渗量(mm); Q ——地面径流量(mm); P ——降雨量(mm); I_a ——初损雨量(mm)。

根据水量平衡原理有:

$$P = I_a + F + Q \quad (4)$$

推得:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)} \quad (P > I_a) \quad (5)$$

$$Q = 0 \quad (P \leq I_a) \quad (6)$$

方程(5)中有 2 个变量 I_a 和 S , I_a 是一个与植被截留、入渗、前期土壤含水量等有关的变量。大量小流域研究结果表明, I_a 和 S 之间存在着良好的线性关系:

$$I_a = \lambda S \quad (7)$$

式中: λ ——初损与流域潜在入渗量的比率,SCS 模型在实际应用中取 $\lambda = 0.2$ 进行计算^[8]。大量试验资料

表明 λ 因地区不同变化范围为 $0.00 \sim 0.30$ ^[8-10], 本文会重新修正研究区 λ 的取值范围。

S 与 CN 值的经验转换关系如下:

$$S = \frac{25\ 400}{CN} - 254 \quad (8)$$

CN 值是反映土地利用、土壤类型、前期土壤含水量的一个综合指标, 美国国家工程手册给出了详细的 CN 值。虽然 CN 可以通过查表得到, 但 CN 值是在美国测定的, 不太适合国内的情况^[11], 利用查得的 CN 值推求的径流量与实测值差别很大。因此本文将逐一运用平均值法、中值法、算术平均值法、S 对数频率分布法和渐近线法^[12]对 CN 值进行反推, 确定适合研究区的 CN 值的取值范围。

由式(3)–(7)得到关于 S 与 Q 的综合计算公式:

$$S = \frac{1}{\lambda} \left\{ \left[P + (1-\lambda) \frac{Q}{2\lambda} \right] - \left[\frac{(1-\lambda)^2 Q^2}{4\lambda^2} + \frac{PQ}{\lambda} \right]^{1/2} \right\} \quad (9)$$

参照黄土高原地区的降雨雨强修正函数^[13], 得到贵州地区的降雨雨强修正函数如下:

$$P_a = P(I_x / \bar{I})^\beta \quad (10)$$

式中: P ——降雨量 (mm); Q ——径流深 (mm); I_a ——初损雨量; S ——潜在蓄水能力; λ ——初损系数; CN ——反映流域特性的综合参数, 与土地利用方式有关; P_a ——修正后的降雨量 (mm); I_x ——时段雨强; \bar{I} ——次降雨平均雨强 (mm/h); β ——雨强修正参数, 表征雨强和径流关系在不同流域水文特点。

3.2 模型评价参数

利用 SCS 模型可以计算降雨形成的地表径流量

的模拟值, 将之与实测径流值进行比较, 计算得出模型效率系数和相关系数后, 可得知 SCS 模型的径流模拟效果。其中相关系数由回归分析得到, Nash 和 Sutcliffe 提出的模型效率系数通过下式得到^[14]:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (R_{\text{obsi}} - R_{\text{cali}})^2}{\sum_{i=1}^n (R_{\text{obsi}} - \overline{R_{\text{obs}}})^2} \quad (11)$$

式中: R_{cali} 和 R_{obsi} ——第 i 场降雨的计算径流量和实测径流量 (mm); $\overline{R_{\text{obs}}}$ ——实测径流量的平均值。E 值越接近 1 说明该模型的拟合程度越好。

4 基于 SCS 模型的坡面产流模拟

坡面产流模拟计算是小流域水土流失研究的重要内容, 径流模拟计算时水文模型的选择与模型参数的率定十分关键。SCS 模型具有参数简单以及计算简便的优点, 基于贵州典型小流域实测的降雨与径流资料, 可对 SCS 模型进行参数修正, 主要针对该模型中的初损系数、CN 值和降雨等参数。通过参数修正优化后的 SCS 模型可以进行同类地区坡面产流量的模拟计算。

4.1 SCS 模型模拟方法比较

由于坡度、坡长对产流机理有重要的影响, 所以有必要按照坡度、坡长分别对 SCS 模型的应用进行探讨。

4.1.1 标准小区 标准小区的坡度为 5° , 坡长为 20 m (表 2), 其 CN 值确定方法为平均值法和 S 对数频率法, 但是得到的最大的模型效率系数以及相关系数不能满足模拟精度要求, 需要进一步进行模型参数的优化。

表 2 标准小区 CN 值反推方法的最优化结果

降雨类型	λ 取值	CN 值确定方法	相关系数	E (模型效率系数)	CN 值
前期型	0.01	平均值法	0.34	-0.25	44
中期型	0.2	S 对数频率法 (10%)	0.15	-0.20	62
后期型	0.05	平均值法	0.79	0.62	69
均匀型	0.05	S 对数频率法 (50%)	0.96	0.92	58

4.1.2 坡长小区 坡长小区的坡度都是 15° , 利用 5 种常用的反推计算 CN 值的方法^[12], 得到了不同 CN 值反推方法下的 CN 值及其相关系数和模型效率系数, 将得到的相关系数和模型效率系数较高的方法整理得到了表 3。初步判定在坡长小区上降雨类型分类下反推 CN 值的方法没有明显的一致性, 但是可以得知平均值法、中值法和算术平均值法是既方便又有效的方法, 而渐近线法只在模拟坡长为 20 m 小区的前期型降雨产生的径流时呈现较好的模拟效果。

4.1.3 坡度小区 由于坡度对产流具有重要影响,

通过模拟分析得到结果 (表 4)。坡度小区的坡长都是 10 m, 坡度小区与坡长小区在反推计算 CN 值的方法上比较相似, 平均值法与算术平均值法有较好的模拟效果, 但在坡度小区中中值法的模拟效果较差。后期型降雨与均匀型降雨运用 S 对数频率法的径流模拟效果较好。

综合分析, CN 值的确定方法是多样的, 与坡长、坡度的相关性不明显, 但是总体来说平均值法与算术平均值法是比较好的方法, 使用 S 对数频率法时的频率取值一般为 10% 和 50%。

表 3 坡长小区 CN 值反推方法的最优化结果

降雨类型	坡长/m	λ 取值	CN 值确定方法	相关系数	E (模型效率系数)	CN
前期型	5	0.05	中值法	0.73	0.60	79
中期型		0.05	平均值法	0.01	0.54	78
后期型		0.01	S 对数频率法(50%)	0.94	0.97	63
均匀型		0.01	中值法	0.77	0.91	55
前期型	10	0.05	算术平均值法	0.49	0.70	77
中期型		0.01	算术平均值法	0.07	0.51	58
后期型		0.01	平均值法	0.82	0.93	51
均匀型		0.01	S 对数频率法(10%)	0.24	0.67	52
前期型	15	0.01	中值法	0.60	0.75	75
中期型		0.05	中值法	0.21	0.60	82
后期型		0.01	算术平均值法	0.95	0.98	72
均匀型		0.01	平均值法	0.96	0.98	62
前期型	20	0.01	渐近线法	0.36	0.68	64
中期型		0.01	算术平均值法	0.15	0.54	68
后期型		0.01	平均值法	0.78	0.89	64
均匀型		0.01	平均值法	0.85	0.95	59
前期型	25	0.1	S 对数频率法(10%)	0.61	0.82	66
中期型		0.01	平均值法	0.05	0.34	59
后期型		0.01	S 对数频率法(10%)	0.29	0.86	22
均匀型		0.3	S 对数频率法(10%)	0.40	0.67	72

表 4 坡度小区 CN 值反推方法的最优化结果

降雨类型	坡度/(°)	λ 取值	CN 值确定方法	相关系数	E (模型效率系数)	CN
前期型	5	0.1	S 对数频率法(10%)	0.81	0.64	70
中期型		0.1	算术平均值法	0.56	0.31	75
后期型		0.05	S 对数频率法(50%)	0.89	0.66	39
均匀型		0.01	S 对数频率法(10%)	0.88	0.70	21
前期型	10	0.05	渐近线法	0.68	0.50	65
中期型		0.01	算术平均值法	0.60	0.36	58
后期型		0.1	S 对数频率法(10%)	0.90	0.76	56
均匀型		0.01	S 对数频率法(10%)	0.88	0.68	21
前期型	15	0.01	S 对数频率法(50%)	0.63	0.66	60
中期型		0.05	算术平均值法	0.82	0.66	73
后期型		0.01	S 对数频率法(10%)	0.82	0.46	41
均匀型		0.01	平均值法	0.44	0.08	40
前期型	20	0.05	平均值法	0.76	0.58	67
中期型		0.01	平均值法	0.68	0.35	46
后期型		0.01	S 对数频率法(10%)	0.85	0.70	37
均匀型		0.05	S 对数频率法(10%)	0.76	0.50	32
前期型	25	0.01	平均值法	0.52	0.59	46
中期型		0.05	平均值法	0.59	0.34	64
后期型		0.1	S 对数频率法(10%)	0.85	0.71	41
均匀型		0.01	S 对数频率法(10%)	0.89	0.70	21

4.2 SCS 模型的初损系数调整

4.2.1 坡长小区 初损系数 λ 一般取值 0.2,但是在研究区 2 个小流域模拟计算后发现 λ 取 0.2 不能满足 SCS 模型径流模拟的精度要求,初损系数 λ 是一个对径流模拟影响较大的参数,必须进一步优化。

研究表明初损系数 λ 是一个区域经验值,其值范围通常在 $0 \sim 0.3^{[9]}$,本研究基于此对毕节小流域进行 SCS 模型的初损系数 λ 优化,得出毕节小流域的标准小区的初损系数如下:前期型降雨、中期型降雨、后期型降雨和均匀型降雨的 λ 值取 0.01,0.01,0.2,

0.05。采用上述 λ 值后最低模型效率系数分别提高了 26,10,4,12 个百分点。

按照坡长变化得到表 3, λ 的取值多数是 0.01, 0.05, 其中初损系数取 0.01, 较经典取值 0.2 低, 说明试验小流域的坡长小区在降雨发生后、地表产流前消耗的雨水较少, 很大部分都成为径流。后期型降雨的相关系数和模型效率系数是最大的, 模拟效果较好, 前期型和均匀型降雨的径流模拟效果也较好, 与未进行雨型分类前的径流模拟效果比较可以得知 λ 的取值与雨型有较大的关联性。

4.2.2 坡度小区 由表 4 得知随着坡度的变化 4 类雨型的初损系数 λ 的取值呈现一定的规律性, 例如前期型降雨和中期型降雨的 λ 值都随着坡度的升高变小, 这与黄土高原地区的 λ 值随着坡度的增加而逐渐变小的规律一致^[8]。后期型降雨的 λ 值在 25° 时最大, 中期型降雨和均匀型降雨的 λ 值随着坡度的增加变化的不明显。从数值上看, λ 的取值和坡长类似, 多数是 0.01, 0.05, 说明坡度小区与坡长小区具有相似的径流初损规律, 进一步说明了 λ 取 0.01 是具有代表性的初损值。与黄土高原地区的研究成果做比较, 张钰娴得出黄土高原地区的 λ 值在缓坡取 0.2, 在坡度为 15° 时取 0.1, 30° 时取 0.03^[8]。由于黄土高原研究区的坡度较大, 所以其 λ 的取值较小, 其取值为 0.01^[13]。紫色土丘陵区 λ 取 0.2 或 0.3^[15]。综合比较, 西南地区的 λ 值比黄土高原地区和紫色土丘陵区的小, 这与区域地形、植被、气候因素以及土壤性质有关。

表 5 雨强修正后的标准小区 CN 值反推方法的最优化结果

降雨类型	CN 值确定方法	β 取值	相关系数	E(模型效率系数)	CN
前期型降雨	S 对数频率法(10%)	-1	0.33	-0.12	3
中期型降雨	算术平均值法	-0.5	0.34	-0.07	55
后期型降雨	算术平均值法	0.2	0.79	0.61	66
均匀型降雨	平均值法	0.4	0.95	0.90	51

4.3.2 坡长小区 坡度为 15°, λ 取值 0.01。从表 6 得到中期型降雨在坡长为 5 m 小区的 SCS 模型经过雨强修正后相关系数以及模型效率系数分别提高了 4.9% 和 19%; 中期型降雨在坡长为 10 m 小区的 SCS 模型经过雨强修正后相关系数以及模型效率系数分别提高了 14% 和 25%, 后期型和均匀型降雨的相关系数都没有改变, 但模型效率系数分别提高了 3.5% 和 3.3%。中期型降雨在坡长为 15 m 小区的 SCS 模型经过雨强修正后相关系数以及模型效率系

4.3 不同雨型下 SCS 模型的降雨雨强调整

由上文对毕节小流域降雨雨强的分析得知坡面产流产沙与每种降雨类型的雨强有极大的相关性, 分析 SCS 模型与降雨雨强的关系将可能进一步提高 SCS 模型的模拟精度, 所以有必要引入雨强修正函数。根据已有的黄土高原地区的雨强修正公式^[13], 以及毕节小流域坡面产流产沙与 I_{60} 的关系最强^[16], 初步确定适合本流域的雨强修正公式如下:

$$P_a = P(I_{60}/\bar{I})^\beta \quad (12)$$

式中: P_a ——修正后的降雨量(mm); I_{60} ——次降雨的最大 60 min 雨强(mm/h); \bar{I} ——次降雨的平均雨强(mm/h); β ——雨强修正参数, 反映径流与雨强关系在不同流域水文的特点。

4.3.1 标准小区 由于在未引入雨强修正系数时 λ 取 0.01 是该区的初损值, 且通过几个小区的分析后得知在 λ 取 0.01 后进行雨强的修正优化是可行且较有效的, 所以通过计算优化分别得到雨强修正后的 SCS 模型模拟结果(表 5)。

优化后的雨强修正后的 SCS 模型模拟结果中坡度为 5°, 坡长为 20 m, λ 取值 0.01。在经过降雨雨强的修正后, 对标准小区径流模拟的结果表明: 前期型降雨的模型值与径流实测值的相关系数与未经雨强修正的结果相差不大, 但模型效率系数有一定的优化, 提高了 13% 左右; 中期型降雨的模型相关系数以及模型效率系数都有提高, 分别提高了 19% 和 13% 左右; 但是降雨雨强的修正对后期型降雨以及均匀型降雨的优化程度不大, 所以该 2 种类型的降雨不需要进行雨强的优化。

数分别提高了 0.5% 和 6.9%; 中期型降雨在坡长为 20 m 小区的 SCS 模型经过雨强修正后相关系数以及模型效率系数分别提高了 2.4% 和 7.2%, 后期型降雨的模型效率系数提高了 0.6%; 中期型降雨和均匀型降雨的 SCS 模型经过雨强修正后相关系数在坡长为 25 m 小区有较大的提高, 分别提高了 39% 和 28%, 其模型效率系数都提高了 45%。后期型降雨的相关系数没有改变, 其模型效率系数增加了 40%, 说明在坡长为 25 m 小区雨强修正的效果比较明显。

表 6 雨强修正后的坡长小区 CN 值反推方法的最优化结果

降雨类型	坡长/m	CN 值确定方法	β 取值	相关系数	E (模型效率系数)	CN
前期型	5	渐近线法	1.0	0.68	0.60	75
中期型		平均值法	0.5	0.59	0.20	70
后期型		平均值法	0.3	0.97	0.92	64
均匀型		中值法	-0.5	0.91	0.77	55
前期型	10	算术平均值法	0.2	0.70	0.49	73
中期型		算术平均值法	-0.5	0.64	0.32	51
后期型		渐近线法	0.1	0.92	0.85	96
均匀型		平均值法	-0.5	0.67	0.28	33
前期型	15	渐近线法	0.3	0.76	0.52	67
中期型		平均值法	1.0	0.61	0.28	61
后期型		平均值法	0.2	0.89	0.79	64
均匀型		渐近线法	0.4	0.96	0.85	61
前期型	20	渐近线法	0.1	0.65	0.36	65
中期型		平均值法	0.4	0.56	0.22	66
后期型		渐近线法	0.1	0.89	0.79	85
均匀型		平均值法	0.1	0.96	0.81	61
前期型	25	平均值法	1.0	0.44	0.04	51
中期型		平均值法	0.2	0.73	0.49	61
后期型		中值法	0.5	0.83	0.69	60
均匀型		平均值法	0.1	0.94	0.85	57

4.3.3 坡度小区 如图 7 所示,后期型降雨在坡度为 5° 小区的 SCS 模型经过雨强优化后相关系数和模型效率系数分别提高了 1.6% 和 14%, 均匀型降雨的相关系数提高了 0.7% 和 1.6%; 坡长为 10 m, λ 取值 0.01。后期型、均匀型降雨在坡度为 10° 小区的 SCS 模型经过雨强调整后相关系数分别提高了 0.6% 和 0.4%, 其模型效率系数分别提高了 5.8% 和 7.0%; 前期型降雨在坡度为 15° 小区的 SCS 模型经过雨强

调整后相关系数和模型效率系数分别提高了 9.7% 和 0.2%。后期型、均匀型降雨在坡度为 15° 小区的模型效率系数分别提高了 14% 和 3.6%; 后期型降雨在坡度为 20° 小区的 SCS 模型经过雨强调整后相关系数和模型效率系数分别提高了 13% 和 20%; 后期型降雨在坡度为 25° 小区的模型效率系数提高了 1%, 相关系数没有改变, 均匀型降雨的相关系数和模型效率系数提高了 0.3% 和 6.2%。

表 7 雨强修正后的坡度小区 CN 值反推方法的最优化结果

降雨类型	坡度/ $^\circ$	β 取值	CN 值确定方法	相关系数	E (模型效率系数)	CN
前期型	5°	0.2	平均值法	0.45	0.57	52
中期型		1.0	算术平均值法	0.55	0.30	65
后期型		0.2	S 对数频率法(10%)	0.90	0.80	32
均匀型		-0.5	算术平均值法	0.89	0.72	25
前期型	10°	0.2	平均值法	0.45	0.50	55
中期型		1.0	算术平均值法	0.60	0.21	69
后期型		-0.5	中值法	0.91	0.82	35
均匀型		-0.5	平均值法	0.89	0.75	23
前期型	15°	0.5	平均值法	0.73	0.66	61
中期型		1.0	算术平均值法	0.81	0.65	70
后期型		0.1	S 对数频率法(10%)	0.82	0.60	33
均匀型		-0.5	算术平均值法	0.43	0.11	33
前期型	20°	0.2	平均值法	0.46	0.56	81
中期型		1.0	平均值法	0.67	0.39	39
后期型		-1.0	算术平均值法	0.85	0.70	37
均匀型		-0.5	S 对数频率法(50%)	0.89	0.70	26
前期型	25°	0.5	渐近线法	0.50	0.60	44
中期型		1.0	算术平均值法	0.59	0.31	67
后期型		-1.0	算术平均值法	0.86	0.74	36
均匀型		-0.5	平均值法	0.89	0.76	23

4.4 不同雨型下 SCS 模型的 CN 值

分析图 2 得知各类型降雨的 CN 取值与坡度、坡长有一定相关性。随着坡长的增加前期型降雨、中期型降雨和后期型降雨的 CN 值呈减少趋势,均匀型降雨的 CN 值呈增加趋势。

分析坡长小区,得到坡长为 5,10,15,20 和 25 m 的小区各降雨类型的 CN 平均值为 67,64,69,68,61。各坡长间的 CN 值最大差值为 8,表明坡长小区的雨前土壤综合状况只有细微差别。

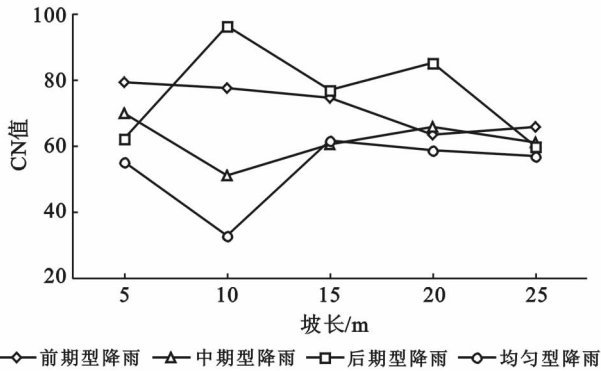


图 2 坡长小区各类型降雨的 CN 值

分析坡度小区得知,前期型降雨、中期型降雨的 CN 值也随着坡度的增加呈减少趋势,后期型降雨以及均匀型降雨的 CN 值随着坡度的增加变化不显著。

分析坡度小区,得到 5°,10°,15°,20°和 25°小区各降雨类型的 CN 平均值为 51,46,50,35,40。各坡度小区的 CN 值最大差值为 15,表明坡度对 CN 值的影响较坡长的大。

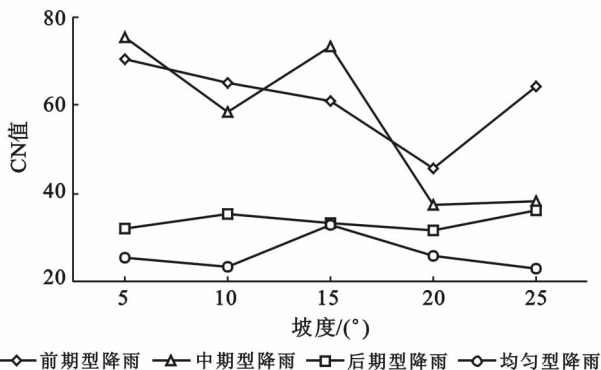


图 3 坡度小区各类型降雨的 CN 值

5 结论

(1) 根据降雨随历时的分配可将研究区的降雨雨型分为 4 类,即前期型(I类)、中期型(II类)、后期型(III类)以及均匀型(IV类)。

(2) 反推 CN 值简单而且效果好的方法为:平均

值法、算术平均值法、S 对数频率法和渐近线法。基于 SCS 模型对研究区坡面径流进行模拟时,初损系数 λ 取值 0.01,0.05 分别占 73%,20%,远小于 $\lambda = 0.2$ 的取值,表明试验小流域的降雨产流过程中径流损失量少,与典型喀斯特地区参数 λ 小、产流条件好的特点一致^[17]。

(3) 基于 SCS 模型得到的模拟径流量与实测径流量的相关系数和模型效率系数都较高,具有较好的模拟效果。其中标准小区的 SCS 模型参数范围还需要进一步率定,对 λ 和 β 取值范围做进一步优化。对降雨进行调整可在一定程度上改善 SCS 模型的径流模拟效果。

(4) 坡长为 5,10,15,20 和 25 m 小区的平均 CN 值为 67,64,69,68,61,随着坡长的增加,前期型降雨、中间型降雨和后期型降雨的 CN 值变幅较小,均匀型降雨的 CN 值呈现增加的趋势;坡度为 5°,10°,15°,20°和 25°小区的平均值 CN 为 51,46,50,35,40,随着坡度的增加,前期型降雨和中期型降雨的 CN 值呈现减少的趋势,后期型降雨和均匀型降雨的 CN 值增幅不大。

[参 考 文 献]

- [1] 周赞,胡顺. 毕节市喀斯特石漠化的成因及防治措施[J]. 贵州大学学报:自然科学版,2007,24(4):421-425.
- [2] Ponce V M, Hawkins R H. Runoff curve number: Has it reached maturity? [J]. Journal of hydrologic engineering, 1996,1(1):11-19.
- [3] 周淑梅,雷廷武. 黄土丘陵沟壑区典型小流域 SCS-CN 方法初损率取值研究[J]. 中国农业科学,2011,44(20):4240-4247.
- [4] 王红雷,王秀茹,王希. 利用 SCS-CN 方法估算流域可收集雨水资源量[J]. 农业工程学报,2012,28(12):86-91.
- [5] 王兴鹏,马轶,张维江,等. SCS 模型在黄土丘陵因子径流场中的应用[J]. 宁夏工程技术,2005,4(2):157-159.
- [6] 王英,黄明斌. 径流曲线法模型参数在黄土地区的优化研究[J]. 水土保持通报,2008,28(1):54-58.
- [7] 殷水清,王杨,谢云,等. 中国降雨过程时程分型特征[J]. 水科学进展,2014,25(5):617-624.
- [8] 张钰娴,穆兴民,王飞,等. 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.
- [9] Cazier D J, Hawkins R H. Regional Application of the Curve Number Method[C]// Water Today and Tomorrow. New York, ASCE, 2011.
- [10] Bosznay M. Generalization of SCS curve number method [J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 1989,115(1):139-144.

(下转第 333 页)

料孔隙率进行了理论计算,并与实测数据对比,相对误差为4.61%,因此说明按此方法计算出混合填料孔隙率较为精确。

(3) 通过连续运行下生态过滤池渗透系数的测定,其变化规律与假设渗流过程相同,并通过试验数据支撑了过滤堵塞过程假设的成立。

[参 考 文 献]

- [1] 许保玖,龙腾锐. 当代给水与废水处理原理[M]. 2版. 北京,高等教育出版社,2000,78.
- [2] Coustumer S L, Fletcher T D, Deletic A, et al. The influence of design parameters on clogging of stormwater biofilters: A large-scale column study [J]. *Water Research*, 2012,46(20):6743-6752.
- [3] Kandra H, Mccarthy D, Fletcher T D, et al. Assessment of clogging phenomena in granular filter media used for stormwater treatment [J]. *Journal of Hydrology*, 2014,512(4):518-527.
- [4] Coustumer S L, Fletcher T D, Deletic A, et al. Hydraulic performance of biofilter systems for stormwater management: Influences of design and operation[J]. *Journal of Hydrology*, 2009,376(1/2):16-23.
- [5] Zinger Y, Blecken G T, Fletcher T D, et al. Optimising nitrogen removal in existing stormwater biofilters: Benefits and tradeoffs of a retrofitted saturated zone [J]. *Ecological Engineering*, 2013,51(2):75-82.
- [6] Glaister B J, Fletcher T D, Cook P L, et al. Co-optimisation of phosphorus and nitrogen removal in stormwater biofilters: The role of filter media, vegetation and saturated zone [J]. *Water Science & Technology*, 2014,69(9):1961-1969.
- [7] Payne E G, Fletcher T D, Russell D G, et al. Temporary storage or permanent removal? The division of nitrogen between biotic assimilation and denitrification in stormwater biofiltration systems[J]. *PloS one*, 2014,9(3):1-12.
- [8] Jones J. H. and Taylor G. S. Septic tank effluent percolation through sands under laboratory conditions[J]. *Soil Science*,1965,99(5):310-309.
- [9] Blazejewski R, Muratalazejewska S. Soil clogging phenomena in constructed wetlands with surface flow[J]. *Water Science and Technology*, 1997,35(5):183-188.
- [10] Payne E G I, Hatt B E, Deletic A, et al. Adoption Guidelines for Stormwater Biofiltration Systems[M]. Melbourne, Australia: Cooperative Research Centre for Water Sensitive Cities, 2015.
- [11] Duran J. Sands, Powders, and Grains: An Introduction to the Physics of Granular Materials[M]. New York: Springer, 2000.
- [12] Reschke T. Schriftenreihe der zementindustrie62/2006 [M]. Dusseldorf: Verlag Bau Technik GmbH, 2000.
- [13] 乔龄山. 水泥堆积密度理论计算方法介绍[J]. *水泥*, 2007(7):1-7.
- [14] 李圭白,张杰. 水质工程学[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005:148-149.
- [15] Kehat E, Lin A, Kaplan A. Clogging of filter media [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 1967,6(1):48-55.
- [11] 魏文秋,谢淑寨. 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.
- [12] 符素华,王向亮,王红叶,等. SCS-CN径流模型中CN值确定方法研究[J]. *干旱区地理*,2012,35(3):415-421.
- [13] 王英. 径流曲线法(SCS-CN)的改进及其在黄土高原的应用[D]. 陕西 杨凌:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,2008.
- [14] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models (part I): A discussion of principles [J]. *Journal of Hydrology*, 1970,10(3):282-290.
- [15] 陈正维,刘兴年,朱波. 基于SCS-CN模型的紫色土坡地径流预测[J]. *农业工程学报*,2014,30(7):72-81.
- [16] 顾璟冉,张兴奇,顾礼彬,等. 黔西高原侵蚀性降雨特征分析[J]. *水土保持研究*,2016,23(2):39-43,48.
- [17] 郑长统,梁虹,舒栋才,等. 基于GIS和RS的喀斯特流域SCS产流模型应用[J]. *地理研究*,2011,30(1):185-194.

(上接第328页)