

基于 SCS-CN 模型的紫色土坡地径流预测

陈正维^{1,2,3}, 刘兴年¹, 朱波^{2,3*}

1. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065;
2. 中国科学院山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041;
3. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘要: 地表径流是引起坡面土壤侵蚀的主要动力, 对降雨径流进行有效的预测, 是紫色土坡地水土保持的基础。SCS-CN 模型中的径流曲线数 CN 和初损系数 λ 作为主要输入参数对径流模拟精度有重要影响, 但在应用于紫色土坡耕地模拟时, 却很少进行坡度的调整, 而坡度是影响降雨产流的重要因子。该文利用紫色土不同坡度的径流小区, 选取 2013 年的 5 场降雨产流的实测数据, 旨在分析紫色土坡耕地降雨产流量与地表坡度的关系, 对现有的基于坡度修正的 SCS-CN 模型进行适用性评价, 并在考虑降雨量影响的基础上对初损系数进行修正。结果表明, 次降雨下径流量随坡度的增大而增大, 并出现径流影响的临界坡度; 经坡度修正后的模型在小降雨事件下的模拟精度较好, 但强降雨条件下预测值比实测值均偏大, 初损系数 $\lambda=0.2$ 适用于紫色土坡地小降雨产流模拟, 在强降雨条件下, λ 值越大, 模型模拟效果越好, 当 $\lambda=0.3$ 时, 修正的模型在紫色土坡地径流模拟效果最理想, 此时, 模拟值与实测值的平均相对误差为 7.42%, 模型效率系数达到 0.99。而基于坡度调整后的 CN 值对应坡度 $6.5^\circ\sim 25^\circ$ 依次为 78.23、78.45、78.77、79.11、79.47。该研究结果可为紫色土丘陵区降雨径流预测及水土保持提供参考。

关键词: 径流; 优化; 降雨; 坡度; SCS-CN 模型; 修正; 径流曲线数; 初损系数

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.07.009

中图分类号: P333.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-07-0072-10

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.
Chen Zhengwei, Liu Xingnian, Zhu Bo. Runoff estimation in hillslope cropland of purple soil based on SCS-CN model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(7): 72-81. (in Chinese with English abstract)

0 引言

四川盆地丘陵区主要分布中生代紫色砂页岩发育的紫色土^[1], 其抗蚀性差, 坡耕地土壤侵蚀强烈, 是长江上游和三峡库区泥沙的主要来源。地表径流是坡面土壤侵蚀主要驱动因素, 同时大量养分物质如氮、磷等伴随着水土流失进入长江上游大小支流, 不仅影响长江上游的水环境质量, 并加剧了三峡库区的水环境压力^[2]。因此, 定量预测不同下垫面条件下的径流量, 作为泥沙、养分和农药等农田非点源污染物流失负荷估算的基础, 对认识紫色丘陵区土壤侵蚀发生规律、开展水土流失预报, 以及长江上游面源污染的控制和水土资源的合理利用和评价都有重要意义。

预测地表径流量的关键是建立方便有效的产流模型。在对土壤入渗产流机理研究的基础上, 许多学者提出了不同的估算坡面产流过程模型, 如 Green-Ampt 下渗方程、Philip 二项式入渗方程, 以及 Horton 于 1940 年提出的著名的 Horton 入渗公式等^[3]。这些水文模型能够有效的估算径流量, 但因为限于大量的输入参数以及复杂的计算, 使得这些模型难以推广应用^[4]。美国农业部根据美国气候特征及多年水文径流资料所研发的 SCS-CN 模型由于其结构简单、所需参数较少、模拟结果准确度较高, 而被广泛应用于次降雨地表径流及其过程的预测中^[5-6]。国内外分布式-半分布式生态水文生态模型, 如 SWAT^[7], EPIC^[8], CREAMS^[9], ANSWERS^[10], AGNPS^[11]等, 均采用 SCS-CN 模型预测径流量。该模型的主要参数径流曲线数 CN 是反映流域前期土壤湿润程度 (Antecedent moisture condition, AMC)、坡度、土壤类型和土地利用现状等综合特性的参数。SCS 模型对 CN 的敏感性很高^[12], Boughton^[13] 研究指出, CN 取值 $\pm 10\%$ 的变化可导致计算径流量 $+55\%$ 和 -45% 的变化。可见, CN 值的确定对降雨径流量的准确预测非常重要。Hawkins^[14] 提出利用降雨径流资料推算径流曲线数 CN 值的渐近线法, 取得较好

收稿日期: 2013-11-22 修订日期: 2014-02-17

基金项目: 中国科学院创新团队项目 (KZZD-EW-TZ-06); 国家重点基础研究发展计划课题 (2012CB417101)

作者简介: 陈正维 (1989-), 男, 海南临高人, 主要从事水力学与水土土壤侵蚀方面研究。成都 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 610065。Email: 461826845@qq.com

*通信作者: 朱波 (1966-), 男, 博士, 研究员, 主要从事生物地球化学循环与非点源污染控制研究。成都 中国科学院山地表生过程与生态调控重点实验室, 610041。Email: bzhu@imde.ac.cn

的精度。符素华等^[15]运用算数平均值法求得北京地区不同土地利用下的 CN 值。洪林等^[16]根据新埠河-桥河流域的实际情况,对模型参数改进后发现模拟效果有很大的改善。夏立忠等^[17]建立降雨量与 CN 的二次回归方程对浅层紫色土坡面径流量进行推算,验证精度较好。刘贤赵等^[18]结合栅格式 DEM,将黄土高原王东沟流域划分成各个子单元从而提出相应的 CN 值,模拟结果与实测资料取得较好的一致性。

尽管相关研究已经很多,在实际应用中径流曲线数 CN 的确定却鲜有将坡度因子考虑在内。实际上,坡度是影响径流的很重要的因子。Chaplot 等^[19]研究发现,地表径流与坡度的相关程度要高于雨强。坡度为 8% 的径流量要比坡度为 4% 的大,且在雨强变大时,坡度的这种影响效应更为明显。王先拓等^[20]利用人工模拟降雨方法,发现大雨强下坡度对径流系数的影响显著,随着坡度增大,径流系数增大。因此,在长江上游的山地丘陵地区,地形变化大,要应用 SCS-CN 模型,若不考虑坡度对产流的影响是不合理的,必然造成径流量模拟的巨大不确定性。此外,大量研究表明,SCS-CN 模型将初损系数标准值定为 0.2,在许多流域的应用中,其有效性大大减弱。Ponce 等^[12]在对 SCS-CN 模型进行理论论证的基础上,指出初损系数并不是一个定值,而是在某一范围内变化,需根据区域特征合理取值。Xiao 等^[21]将 SCS-CN 模型应用于黄土高原六道沟小流域发现,初损系数取值 0.22 时模拟效果更好。SCS-CN 模型在紫色土坡地应用已有报道^[22],但并未考虑分析坡度的影响。而 SCS-CN 模型主要依托于美国大量缓坡(坡度 5% 左右)降雨产流资料发展起来的^[23-25],是否适合长江上游陡坡地的降雨产流模拟还有待进一步研究。本文利用不同坡度的紫色土坡耕地降雨径流野外观测资料,引入坡度因子,对基于坡度修正的 SCS-CN 模型在紫色土丘陵区的实用性进行评价,特别针对 Williams 坡度修正方法^[23]以及 Huang 等^[24]推出的公式进行验证,并考虑降雨量影响,结合紫色土区降雨入渗特征,在前人研究的基础上对初损系数进行修正,为 SCS-CN 模型在紫色土区径流量的预报及区域水土流失监测评估中的进一步应用提供参考。

1 材料与方 法

1.1 模型原理

SCS-CN 模型^[25]是美国水土保持局根据对大量试验结果的研究,基于 2 个基本假定和水量平衡方程的基础上研制的。第一个基本假定是:实际入渗量 (F) 与土壤潜在滞蓄能力 (S) 的比值等于实际

地表径流深 (Q) 与可能最大径流深之比值^[25],即:

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

按水量平衡原理:

$$P = I_a + F + Q \quad (2)$$

经整理后,可用下述公式计算地表径流深:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (3)$$

式中: S 为土壤潜在最大滞蓄量, mm; I_a 为降雨初损, mm; P 为降雨量, mm; F 为实际入渗量, mm。

另一个基本假定是,初损是土壤潜在最大滞蓄量的一部分,即 S 与 I_a 关系为 $I_a = \lambda S$ ^[25]。 λ 为初损系数,是区域参数,无量纲,根据地表土壤水文条件的不同,一般取值范围为 $0 \leq \lambda \leq 0.4$ 。

Mockus^[26]根据美国大量的实测数据推导出 $I_a = 0.2S$ ^[25],则得到只需要 1 个参数的降雨-径流关系方程:

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad P \geq 0.2S \quad (4)$$

$$Q = 0 \quad P \leq 0.2S \quad (5)$$

潜在最大滞蓄量 S 可用无量纲参数 CN 表示为^[25]:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (6)$$

式中: CN 由流域前期土壤湿润程度 (AMC)、坡度、水文土壤类型 (hydrologic soil group, HSG) 和土地利用现状综合确定。根据土壤最小下渗率及土壤质地的不同,SCS-CN 模型将水文土壤类型划分为 A、B、C、D 4 类,其渗透性依次降低,如表 1。CN 值的计算方法是,先假定前期土壤湿度 AMC 处于一般条件下 (AMC II),根据流域水文土壤类型、土地覆盖/土地利用等因素查美国农业部提供的 SCS 手册得到 CN_{II} ,再通过公式转换成干旱条件 (AMC I) CN_I 、湿润条件 (AMC III) CN_{III} 。根据次降雨前 5 d 的降水量划分前期土壤湿度 (表 2)。AMC I、AMC III 条件下的 CN 值转换公式如下^[7,23]:

$$CN_I = CN_{II} -$$

$$\frac{20 \cdot (100 - CN_{II})}{100 - CN_{II} + \exp[2.533 - 0.0636 \cdot (100 - CN_{II})]} \quad (7)$$

$$CN_{III} = CN_{II} \cdot \exp[0.00673 \cdot (100 - CN_{II})] \quad (8)$$

表1 水文学土壤类型划分

Table 1 Hydrologic classification of soil group

土壤类型 Soil type	最小下渗率 Minimum of infiltration rate/(mm·h ⁻¹)	土壤质地 Soil texture
A	>7.26	砂土、壤质砂土、砂质壤土
B	3.81~7.26	壤土、粉砂壤土
C	1.27~<3.81	砂黏壤土
D	<1.27	黏壤土、粉砂黏壤土、砂黏土、粉砂黏土

表2 前期土壤湿润程度(AMC)等级划分

Table 2 Classification of antecedent moisture condition (AMC)

AMC	前5d累积雨量 Antecedent Precipitation Index for 5 Days/mm	
	休眠季节 Dormant season	生长季节 Growing season
	I	<12.7
II	12.7~27.9	35.6~53.3
III	>27.9	>53.3

1.1.1 Williams 坡度修正公式

传统的 CN_{II} 是假设在坡度为 5% 条件下得到的^[23-25]。Williams 等^[23]提出一般条件下 CN_{II} 值的修正公式:

$$CN_{Is} = \frac{CN_{III} - CN_{II}}{3} \cdot [1 - 2 \exp(-13.86slp)] + CN_{II} \quad (9)$$

式中: CN_{II} 和 CN_{III} 分别表示 AMCII 和 AMCIII 条件下的 CN 值, CN_{III} 值由式 (8) 进行计算得出, CN_{Is} 为修正后的 CN_{II} 值, slp 表示平均坡度, %。

1.1.2 Huang 坡度修正公式

Huang 等^[24]对式 (9) 进行了改进, 使之适应黄土高原坡地的降雨径流预测。Huang 等提出的 CN_{II} 对应不同坡度的公式如下:

$$CN_{Is} = CN_{II} \cdot \frac{322.79 + 15.63slp}{slp + 323.52} \quad (10)$$

式中的符号意义同上。

1.2 试验观测设计

1.2.1 试验区概况

野外试验与观测主要依托中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站。该站位于四川盆地中部偏北的低山丘陵区, 地处涪江支流的弥江和湍江的分水岭上 (105°27'E、31°16'N), 属于亚热带湿润季风气候, 年均气温 17.3℃, 极端最高气温 40℃, 极端最低气温 -5.1℃, 无霜期为 295 d。多年平均降雨量 826 mm, 年内降雨分布极不均匀, 超过 80% 的降雨集中在 5—9 月份, 而每年 12 月份至来年 4 月份的降雨量只占全年总降雨量 10% 左右。该丘陵区出露的岩层主要为中生代侏罗系蓬莱镇组紫色砂页岩, 产状基本水平, 泥岩和砂岩呈不等厚互层。土壤为

石灰性紫色土, 为典型旱作土壤, 平均土层厚度约 60 cm。

1.2.2 小区试验设计与观测

径流小区根据紫色土坡耕地地形特征, 设计的坡度分别为 6.5°、10°、15°、20°、25°, 每个坡度均对应有 3 个重复的径流小区。每个小区的面积为 20 m×5 m, 小区种植制度为紫色土丘陵区典型的冬小麦-夏玉米轮作制, 10 月底种植小麦, 5 月种植玉米, 小区的播种、施肥方式均相同, 作物种植期间不再灌溉与追肥, 小区植被覆盖度基本相同。为保障各小区水系独立, 防止附近水流侧渗影响, 小区四周用水泥板围埂, 底部是岩层, 每个小区坡脚均接有由在坡底设置的汇流沟连接着的径流池, 用以收集径流和泥沙, 各个出水口和集水池均相互独立, 按照专利 (ZL2007100640686) 技术建造。收集地表径流的径流池尺寸为: 2.65 m×2 m×1.6 m。待每次降雨产流结束后, 测量径流池中的水位, 计算径流量。径流量为 3 个重复小区测定值的平均值。降雨数据由 100 m 外的中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站气象观测场获得。供试土壤为石灰性紫色土, 作为紫色土的 1 个亚类, 其分布面积约占整个紫色土地区的 50% 以上, 主要由钙质砂页岩风化而成, 质地中壤, 黏粒 < 15%, 粉粒为 32.1%~41.8%, 容重在 1.3~1.5 g/cm³ 之间, 为粉砂质土壤, 饱和含水率 36.1%, 田间持水量 28.1%~38.3%, 凋萎湿度为 5.4%~7.7%。

依据 SCS-CN 水文学土壤分类标准, 径流小区水文学土壤类型属于 B 类。小区为行间作物地, 耕作方式为直行顺坡耕作, 水文条件较好, 查表获得一般条件下 (AMCII) CN 值为 78。本地区主要降雨集中于 5—9 月, 故主要选取该时段的降雨径流资料进行参数率定。以晚八点至次日晚八点为 1 d 完整监测时间, 试验期内共发生 43 次降雨事件, 依照国家气象局颁布的降水强度等级划分标准 (内陆部分), 其中大暴雨 (100~249.9 mm) 降雨事件 3 次、暴雨 (50~99.9 mm) 4 次、大雨 (25~49.9 mm) 6 次、中雨 (10~24.9 mm) 7 次, 其他为小雨降雨事件, 总降雨量达 1 073.7 mm。考虑紫色土区降雨产流特性, 本文将暴雨 (50~99.9 mm) 及其以上降雨事件称之为强降雨事件, 而将降雨量低于 50mm 的降雨事件称为小降雨事件。本次试验过程中, 小雨降雨事件均无地表径流产生, 中雨事件除 6 月 24 日降雨外, 亦无地表径流产生, 且因自然降雨具有随机性和突发性, 并受野外试验实际情况限制, 试验期内共观测到 5 次地表径流产流事件, 降雨时间分别为: 6 月 24 日、7 月 18 日、7 月 24 日、8 月 8 日、9 月 19 日 (如表 3), 且各次降雨土壤

前期湿润程度处于 AMCII 条件，本文选取这 5 次典型次降雨径流事件进行统计分析。

1.3 模型模拟精度评价

采用 Nash 模型效率系数 $E^{[27]}$ 和相对误差 (relative error, RE) 评价模型模拟精度，模型效率系数 E 及相对误差 RE 描述如下：

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obsi} - Q_{cali})^2}{\sum_{i=1}^n \left(Q_{obsi} - \bar{Q}_{obs} \right)^2} \quad (11)$$

$$RE = \left(\frac{Q_{cali}}{Q_{obsi}} - 1 \right) \times 100\% \quad (12)$$

式中： Q_{obsi} 为第 i 场降雨实测径流深，mm； Q_{cali} 为相应的预测径流深，mm； \bar{Q}_{obs} 为平均实测径流深，mm； n 为总降雨径流场次。模型效率系数 E 越高，说明实测值与预测值拟合得越好。而相对误差 RE 则以实测径流深的 20% 为许可误差^[23]。

2 结果与讨论

2.1 坡度对地表径流的影响

野外观测共获得 2013 年 6 月 24 日、7 月 18 日、7 月 24 日、8 月 8 日、9 月 19 日的 5 场降雨的径流量数据。各次降雨量在 25.8~108.6 mm 之间，雨强在 4.7~27.2 mm/h 之间。野外观测的降雨-径流基本特征见表 3。

表 3 次降雨下不同坡度径流深
Table 3 Rainfall-runoff discharge in different treatments of slope gradients

序列号 Serial No.	降雨事件 Rainfall event	雨型 Rainfall pattern	降雨量 Rainfall/mm	不同坡度下径流深 Runoff depth for different treatments of slope gradients/mm				
				6.5°	10°	15°	20°	25°
1	6 月 24 日	大雨	25.8	1.61	1.64	1.73	1.83	1.71
2	7 月 18 日	大暴雨	108.6	43.39	44.11	45.49	50.73	47.39
3	7 月 24 日	中雨	19.4	0.41	0.44	0.47	0.55	0.53
4	8 月 8 日	暴雨	55.0	10.91	11.62	12.60	13.38	13.22
5	9 月 19 日	暴雨	77.0	21.79	23.06	24.86	24.36	25.53

单次降雨产流事件中，地表径流深随着坡度的增加而呈先增大后减小趋势，从坡度为 6.5° 到 25°，历次降雨的径流深分别最高增加了 13.7%、16.9%、34.1%、22.6% 和 17.2% (表 3)。这表明，坡度对径流深的影响是显著的。这可能与坡向势能随坡度增大而增加有关^[28]。坡向势能增加，导致坡面水流速率增大，从而缩短径流入渗时间，入渗量减小，地表径流量随之增大。但在前 4 次降雨中，径流量并非随坡度呈一直性增大趋势，而是当坡度达到 20° 以后，其径流深反而趋于减小，即在 20°~25°

之间可能存在一临界坡度 (图 1)。这与傅斌^[29]在紫色土坡耕地不同坡度径流小区模拟降雨试验结果是基本一致的。王全九等^[30]在黄土高原野外径流试验小区通过田间模拟降雨试验分析坡度对坡面物质迁移特性的影响时发现，在降雨强度一定的条件下，径流量在坡度为 15° 左右达到最大。而 9 月 19 日因降雨历时长，而雨强较小，临界坡度效应并不明显，径流量随坡度呈一直增加趋势。可见，有关径流产生的临界坡度有待进一步研究。但在紫色土坡耕地中应用 SCS-CN 模型，需要考虑坡度因子的影响效应。

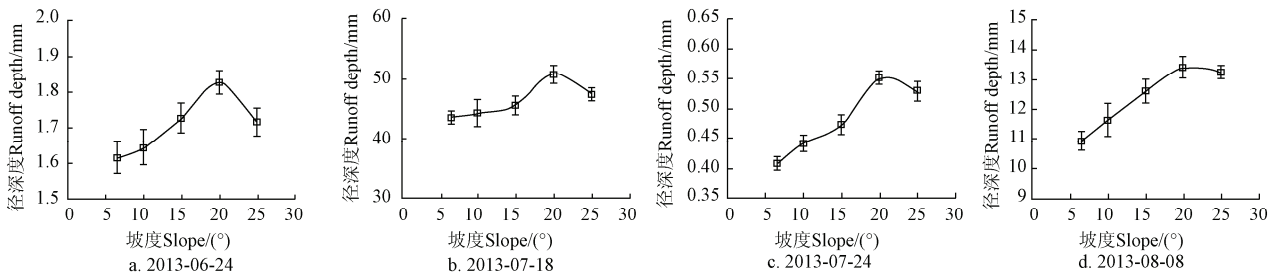


图 1 坡度对径流深的影响
Fig.1 Influence of slope gradient on runoff depth

2.2 基于 Williams 坡度修正公式的 SCS-CN 模型预测径流

SWAT 模型中进行产流预测时亦使用 Williams 坡度修正公式对 CN 值进行调整^[7,23]。但相关应用

研究报道却极为少见。在紫色土坡地条件下，经调整后坡度 6.5°~25° 对应的 CN 值依次为 80.44、81.42、81.95、82.10、83.14，并将其依次代入降雨-径流关系式 (4)、(6) 中，得到相应的地表径流

量, 结果表明, 应用 Williams 公式所预测的地表径流量随坡度的增大而增加, 但均大于实测值, 尽管模型效率系数 E 为 0.76, 但若以 20% 的相对误差为许可误差^[23], 则仅有 8% 的合格率, 相对误差大部分分布在 40%~50% 左右, 最大达到 122%, 其预测径流与实测径流的差异如图 2a, 这表明直接应用 Williams 修正公式开展紫色土坡地的降雨径流预测是不合适的。

2.3 基于 Huang 坡度修正公式的 SCS-CN 模型预测径流

在分析 Williams 公式在黄土高原应用的基础上, 根据大量野外观测资料, Huang 等^[24]对 Williams 坡度修正公式进行了改进, 认为修正后的模型在黄土高原坡地的降雨径流预测中获得了较理想的预测效果。在紫色土坡地条件下, 经公式 (10) 调整 CN 值后的预测径流深与实测径流深的差异如图 2b, Huang 公式较 Williams 公式, 其修正的坡度对应 CN 值如表 4, 可以看出, CN 值随坡度依次增加, 较 Williams 公式的调整值均变小, 且所预测的精度

有了较大的提高, 模型效率系数 E 从 0.76 提高到 0.90。6 月 24 日和 7 月 24 日的 2 场次降雨的预测径流量与实测径流值的相对误差均在 20% 的许可误差范围内, 6 月 24 日降雨 25° 坡面径流量预测值与实测值误差较大 (达到 19.88%), 这是由于本场次降雨产流中, 出现临界坡度而公式未将其考虑在内而造成的, 但误差尚在可接受范围内。其余均控制在 13% 内, 最小达到 2.48% (表 4), 且 2 场次降雨预测径流的平均相对误差绝对值分别为 7.58% 和 8.92%, 均满足精度要求。尽管反映模型总体预测效果的效率系数 E 基本满足要求^[21], 但 Huang 公式在强降雨的场次预测精度仍差强人意, 其预测结果均偏高, 平均相对误差为 24.69%, 以实际径流深的 20% 为许可误差^[23], 相对误差合格率仅为 20%, 即仅有 20% 的预测结果在许可误差范围内, 80% 的预测结果相对误差在 21.19% 以上, 最大达到 37.12% (表 4), 这表明适用于黄土高原的基于坡度修正的 Huang 公式并不能适用强降雨条件下紫色土坡地的径流量预测。

表 4 强降雨下 (50 mm 以上) Huang 坡度修正公式的径流预测值与实测值

Table 4 Comparison of observed runoff and runoff estimated by equation developed by Huang under heavy rainfall (above 50 mm)

降雨事件 Rainfall event	降雨量 Rainfall/mm	坡度 Slope/(°)	CN_{II} 修正值 Modified value of CN_{II}	实测值 Observed runoff/mm	预测值 Predicted runoff/mm	相对误差 Relative error/%	平均相对误差 Mean relative error/%	模型效率系数 Nash-Sutcliffe efficiency
6 月 24 日	25.8	6.5	78.23	1.61	1.65	2.48	7.58	0.99
		10	78.45	1.64	1.72	4.88		
		15	78.77	1.73	1.82	5.20		
		20	79.11	1.83	1.93	5.46		
		25	79.47	1.71	2.05	19.88		
7 月 18 日	108.6	6.5	78.23	43.39	54.02	24.50	19.73	0.90
		10	78.45	44.10	54.47	23.51		
		15	78.77	45.49	55.13	21.19		
		20	79.11	50.73	55.83	10.05		
		25	79.47	47.39	56.58	19.39		
7 月 24 日	19.4	6.5	78.23	0.41	0.36	-12.20	8.92	0.99
		10	78.45	0.44	0.39	-11.36		
		15	78.77	0.47	0.44	-6.38		
		20	79.11	0.55	0.49	-10.91		
		25	79.47	0.53	0.55	-3.77		
8 月 8 日	55.0	6.5	78.23	10.91	14.96	37.12	26.71	0.51
		10	78.45	11.62	15.20	30.81		
		15	78.77	12.60	15.54	23.33		
		20	79.11	13.38	15.91	18.91		
		25	79.47	13.22	16.31	23.37		
9 月 19 日	77.0	6.5	78.23	21.79	29.58	35.75	27.64	0.34
		10	78.45	23.06	29.92	29.75		
		15	78.77	24.86	30.41	22.33		
		20	79.11	24.36	30.94	27.01		
		25	79.47	25.53	31.50	23.38		

2.4 基于初损系数 λ 优化和Huang坡度修正公式的 SCS-CN 模型预测径流

2.4.1 紫色土地入渗产流特征

雨水降落到坡面，会经过截留、填洼、蓄渗等过程，当降雨强度超过坡面土壤水的入渗率，则会形成超渗产流。若坡面下存在弱透水率的隔水土层或不透土层，且降雨强度低于地面下渗能力，土壤包气带会因入渗降水而达到饱和，此时，土壤水储蓄变量与土壤水流出量达到平衡从而发生蓄满产流。包气带结构特征、土壤入渗性能与降雨强度的对比关系等是判断坡面产流机制的重要依据^[31]。紫色土地土壤层浅薄，质地疏松，孔隙度大，土壤渗透性强且持水力低，下伏结构紧密、弱透水性的紫色泥页岩层，呈现独特的“二元岩土结构”，这些发育特性决定了紫色土具有极强的渗透性，雨水极易下渗，使土层蓄满达到饱和，并沿着坡向移动形成坡面径流^[2]。雨前土壤含水量较低，未达到饱和状态，由于紫色土含较多易吸湿的黏土矿物，且结构疏松，非毛管孔隙占比大，紫色土潜在初始入渗率较大，降雨初始阶段，雨水渗入土层，以增加土壤含水量。陈一兵等^[32]研究紫色土的入渗特性时发现，双环法渗透试验条件下，紫色土稳定入渗速率为 101 mm/h，最大入渗速率可达 440 mm/h，而在人工模拟降雨强度为 70 mm/h 条件下，前 20 min 内雨水均渗入土壤，这也表明，即使在较强降雨条件下，仍不能满足紫色土表层土壤水分较强的渗透能力，随着降雨产流的进行，紫色土地易于形成蓄满产流。傅涛^[33]研究指出，大多数降雨情况下，紫色土坡耕地的入渗能力很强，地表径流滞后于壤中流发生，为饱和地面径流。可见，紫色土作为一种薄层土壤，坡地产流模式应以蓄满产流为主。这与芮孝芳^[34]根据包气带结构和降雨特性对自然界可能出现的产流机制提出的理论概括是相一致的。

2.4.2 初损系数 λ 的优化

根据美国大量野外观测数据的线性统计，SCS-CN 模型将初损系数定为 0.2^[5-6]。但在实际应用时，初损系数所取标准值的有效性受到质疑。Mishra 等^[35]通过分析美国 84 个小流域的降雨径流数据提出强降雨与土壤最大滞蓄能力 S 的非线性关系，同时采用变化的初损系数进行模型模拟，取得较好的拟合效果。Woodward 等^[36]研究也表明，同一流域不同降雨事件初损系数的取值均不相同。Ponce 等^[12]亦指出，初损系数作为区域化参数，应进行合理取值。在紫色土地应用 SCS-CN 模型，需要对初损系数进行一定的优化修正。对一般坡地而言，当坡度小于 30°时，坡度对入渗率的影响是可以忽略的^[37]。由图 3 可以看出，在强降雨条件下（50 mm 以上）的初损系数 λ 为 0.2~0.4 之间时，随着初损系数的增大，模型总体的预测值与实测值的平均相对误差减少，至 $\lambda=0.3$ 时达到最小，随后平均相对误差逐渐增大，而模型效率系数则表现相反，在 $\lambda=0.3$ 附近达到最大值。从中，我们可以得出，强降雨条件下 λ 越大，模型预测精度越高，增大至 0.3 时模型取得最理想的预测效果（ $E=0.99$ ， $RE=7.42\%$ ）。这主要与紫色土的物理性质有关。在强降雨条件下，由于紫色土结构疏松，本身分布较多非毛管空隙，其孔隙度较毛管孔隙度大，导水能力较强，降水能迅速入渗土中，雨量的增大也进一步促进土壤水分的入渗。傅斌等^[38]利用人工模拟降雨研究紫色土坡耕地的入渗规律发现，入渗率随雨强的增加而增大。刘刚才等^[39]在研究常规耕作制度下紫色土地径流发生特征时也指出，紫色土耕作层存在大孔隙水流或管流，且在暴雨或大暴雨下，紫色土耕地的表面径流主要由饱和超渗产流形成。丁文峰等^[40]在进行紫色土地面小区的人工降雨产流试验中甚至发现，在雨量为 60 mm，集中降雨 1 h 下，试验小区内均未产生地表径流而仅发生壤中流。这

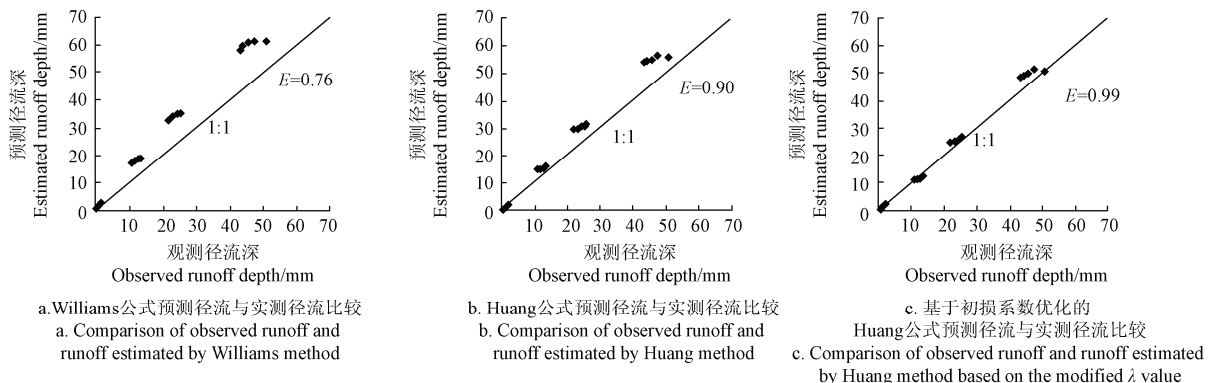


图 2 3 种方法预测径流与实测径流比较

Fig.2 Observed versus predicted runoff depth by (a) modified SCS-CN method proposed by Williams, (b)equation developed by Huang, (c)modified SCS-CN method by Huang in case of heavy rainfall with an initial abstraction ratio of 0.3.

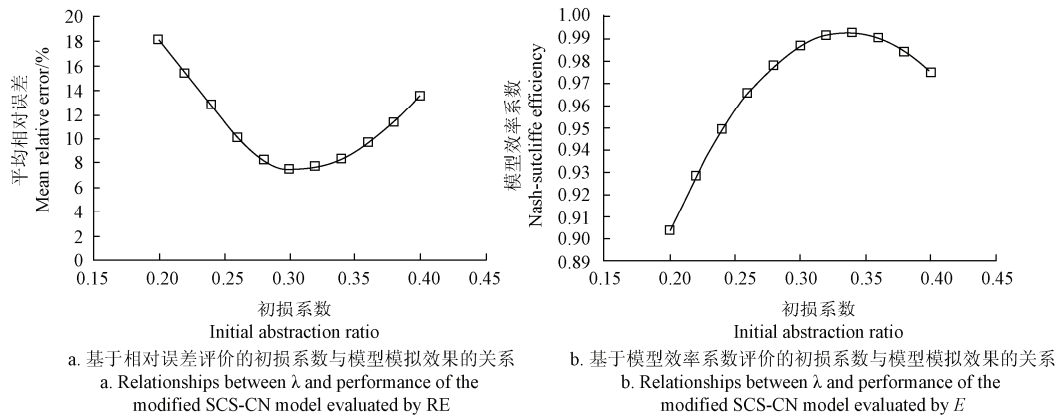


Fig.3 Relationships between initial abstraction ratio and performance of modified SCS-CN model, (a) evaluated by mean relative error (RE) and (b) Nash-Sutcliffe efficiency (E).

都反映了紫色土入渗能力大的特性, 在强降雨条件下, 紫色土的前期初损入渗将有所增大。由前所述, 初损系数 λ 由土壤最大滞蓄能力 S 和初损量 I_a 共同确定。当坡地水文土壤条件、土地利用方式、降雨时间前期土壤湿度一定时, 其土壤最大滞蓄能力 S 为一定值。故若初损量增大, 其初损系数值在强降雨下亦有增大的趋势。Xiao 等^[21]在研究黄土高原初损系数的取值时也发现, 当降雨量超过 50 mm 时, λ 值将增大。基于上述分析, 本研究将强降雨下

(50 mm 以上) 的 λ 值定为 0.3, 而其余降雨仍取标准值 0.2。结合 Huang 公式, 预测径流与实测径流的差异如图 2c。结果显示, 参数修正后的预测值与模拟值拟合得很好, 模型效率系数 E 达到 0.99, 取得十分良好的预测效果。强降雨条件下的预测精度相较 Huang 公式有了较大的提高, 相对误差最大不超过 13%, 最小仅为 0.81%, 5 次降雨的平均相对误差绝对值分别为 7.58%、7.93%、8.92%、5.98%、7.13% (如表 5)。

表 5 修正的 SCS-CN 模型预测径流值与实测值
Table 5 Comparisons of observed runoff and runoff simulated by modified SCS-CN method

降雨事件 Rainfall event	降雨量 Rainfall/ mm	坡度 Slope/(°)	CN_{II} 修正值 Modified value of CN_{II}	初损系数值 Modified value of λ	实测值 Observed runoff/mm	预测值 Predicted runoff/mm	相对误差 Relative error/%	平均相对误差 Mean relative error/%	模型效率系数 Nash-Sutcliffe efficiency
6 月 24 日	25.8	6.5	78.23	0.2	1.61	1.65	2.48	7.58	0.99
		10	78.45		1.64	1.72	4.88		
		15	78.77		1.73	1.82	5.20		
		20	79.11		1.83	1.93	5.46		
		25	79.47		1.71	2.05	19.88		
7 月 18 日	108.6	6.5	78.23	0.3	43.39	48.31	11.34	7.93	0.98
		10	78.45		44.10	48.81	10.68		
		15	78.77		45.49	49.54	8.90		
		20	79.11		50.73	50.32	-0.81		
		25	79.47		47.39	51.15	7.93		
7 月 24 日	19.4	6.5	78.23	0.2	0.41	0.36	-12.20	8.92	0.99
		10	78.45		0.44	0.39	-11.36		
		15	78.77		0.47	0.44	-6.38		
		20	79.11		0.55	0.49	-10.91		
		25	79.47		0.53	0.55	-3.77		
8 月 8 日	55.0	6.5	78.23	0.3	10.91	10.93	0.18	5.98	0.96
		10	78.45		11.62	11.17	-3.87		
		15	78.77		12.60	11.54	-8.41		
		20	79.11		13.38	11.93	-10.84		
		25	79.47		13.22	12.35	-6.58		
9 月 19 日	77.0	6.5	78.23	0.3	21.79	24.61	12.94	7.13	0.94
		10	78.45		23.06	24.97	8.28		
		15	78.77		24.86	25.52	2.65		
		20	79.11		24.36	26.09	7.10		
		25	79.47		25.53	26.72	4.66		

3 结 论

1) 坡度对紫色土降雨产流的影响主要表现为相同降雨条件下, 坡度越陡, 地表径流量越大, 但地表径流随坡度的增大并非无限上升的, 可能存在临界坡度, 在临界坡度范围内, 紫色土地径流量可能达到临界值。

2) 基于 Williams 修正公式的 SCS-CN 模型应用于紫色土地时, 径流预测值均偏高, 模拟精度较差, 模型效率系数为 0.76, 而基于 Huang 公式修正的模型预测精度略有改善, 模型效率系数达到 0.9, 在小降雨事件有较好的效果, 但对于强降雨事件 (50 mm 以上) 径流预测值仍偏高。

3) 利用野外观测资料, 对强降雨条件下 (50 mm 以上) 的紫色土产流的初损系数进行了本地化修正, 强降雨条件下 λ 取值为 0.3, 而小降雨事件 λ 仍取 0.2 时, 模拟效果较理想, 模型模拟效率系数达到 0.99, 五次降雨的平均相对误差绝对值分别为 7.58%、7.93%、8.92%、5.98%、7.13%, 特别是与 Huang 坡度修正公式预测效果相比, 大大提高了强降雨事件的模拟精度, 用 Huang 坡度修正公式调整的 CN 值随坡度 $6.5^{\circ}\sim 25^{\circ}$ 依次为 78.23、78.45、78.77、79.11、79.47, 可为紫色土坡耕地的降雨径流预测提供参考, 而试验中出现的临界坡度效应对模型预测效果的影响仍需要进一步的试验观测分析。

参 考 文 献

- [1] Zhu B, Wang T, You X, et al. Nutrient release from weathering of purplish rock[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(2): 257-264.
- [2] Zhu B, Wang T, Kuang F H, et al. Measurements of nitrate leaching from a hillslope cropland in the central Sichuan Basin, China[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(4): 1419-1426.
- [3] 符素华, 刘宝元, 吴敬东, 等. 北京地区坡面径流计算模型比较研究[J]. *地理科学*, 2002, 22(5): 604-609.
Fu Suhua, Liu Baoyuan, Wu Jingdong, et al. Study on runoff calculation method in Beijing mountainous area[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(5): 604-609. (in Chinese with English abstract)
- [4] Wu T H, Hall J A, Bonta J V. Evaluation of runoff and erosion models[J]. *Journal of the Irrigation and Drainage Engineering*, 1993, 119(2): 364-382.
- [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] Shi Z H, Chen L D, Fang N F, et al. Research on the SCS-CN initial abstraction ratio using rainfall-runoff event analysis in the Three Gorges Area, China[J]. *Catena*, 2009, 77(1): 1-7.
- [7] Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development[J]. *Journal of American Water Resources Association*, 1998, 34(1): 73-79.
- [8] Sharpley A N, Williams J R. EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation[R]. Washington D C: US Government Printing Office, US Department of Agriculture Technical Bulletin No. 1768, 1990.
- [9] Knisel W G. CREAMS: A Field-scale Model for Chemical, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems[R]. Washington D C: US Department of Agriculture, Conservation Research Report No. 26, 1980.
- [10] Beasley D B, Huggins L F, Monke E J. ANSWERS: A model for watershed planning[J]. *Transactions of the ASAE*, 1980, 23(4): 938-944.
- [11] Young R A, Onstad C A, Bosch D D, et al. AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1989, 44(2): 168-173.
- [12] Ponce V M, Hawkins R H. Runoff curve number: Has it reached maturity? [J] *Journal of Hydrologic Engineering*, 1996, 1(1): 11-19.
- [13] Boughton W C A. A review of the USDA SCS curve number method[J]. *Australian Journal of Research*, 1989(3): 511-523.
- [14] Hawkins R H. Asymptotic determination of runoff curve numbers from data[J]. *Journal of the Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 1993, 119(2): 334-345.
- [15] 符素华, 王红叶, 王向亮, 等. 北京地区径流曲线数模型中的径流曲线数[J]. *地理研究*, 2013, 32(5): 797-807.
Fu Suhua, Wang Hongye, Wang Xiangliang, et al. The runoff curve number of SCS-CN method in Beijing[J]. *Geographical Research*, 2013, 32(5): 797-807. (in Chinese with English abstract)
- [16] 洪林, 罗琳, 江海涛. SCS 模型在流域尺度水文模拟中的应用[J]. *武汉大学学报: 工学版*, 2009, 42(5): 582-587.
Hong Lin, Luo Lin, Jiang Haitao. Application of SCS model to hydrological simulation at an agricultural watershed scale[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2009, 42(5): 582-587. (in Chinese with English abstract)
- [17] 夏立忠, 李运东, 马力, 等. 基于 SCS 模型的浅层紫色土柑桔园坡面径流的计算参数确定[J]. *土壤*, 2010, 42(6): 1003-1008.
Xia Lizhong, Li Yundong, Ma Li, et al. Parameters calibration of SCS method for calculation of surface rainfall runoff from slope citrus land with thin layer of sandy loam purple soil[J]. *Soils*, 2010, 42(6): 1003-1008. (in Chinese with English abstract)
- [18] 刘贤赵, 康绍忠, 刘德林, 等. 基于地理信息的 SCS

- 模型及其在黄土高原小流域降雨-径流关系中的应用[J]. 农业工程学报, 2005, 21(5): 93-97.
- Liu Xianzhao, Kang Shaozhong, Liu Delin, et al. SCS model based on geographic information and its application to simulate rainfall-runoff relationship at typical small watershed level in Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(5): 93-97. (in Chinese with English abstract)
- [19] Chaplot V M, Bissonnais Y L. Runoff features for interrill erosion at different rainfall intensities, slope lengths, and gradients in an agricultural loessial hillslope[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(3): 844-851.
- [20] 王先拓, 王玉宽, 傅斌, 等. 川中丘陵区紫色土坡耕地产流特征试验研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(5): 9-12.
- Wang Xiantuo, Wang Yukuan, Fu Bin, et al. Experimental study on runoff characteristics of slope land in Sichuan Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(5): 9-12. (in Chinese with English abstract)
- [21] Xiao B, Wang Q H, Fan J, et al. Application of the SCS-CN model to runoff estimation in a small watershed with high spatial heterogeneity[J]. Pedosphere, 2011, 21(6): 738-749.
- [22] 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.
- Gao Yang, Zhu Bo, Miu Chiyuan, et al. Application of SCS model to estimate the volume of rainfall runoff in sloping field of purple soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(11): 396-400. (in Chinese with English abstract)
- [23] 徐宗学. 水文模型[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- Xu Zongxue. Hydrology Model[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [24] Huang M B, Gallichand J, Wang Z L, et al. A modification to the Soil Conservation Service curve number method for steep slopes in the Loess Plateau of China[J]. Hydrology Process, 2006, 20(3): 579-589.
- [25] Soil Conservation Service. National engineering handbook, Section 4: Hydrology[R]. Washington D C: US Department of Agriculture Soil Conservation Service, 1972.
- [26] Mockus V. Estimation of Total (and peak rates of) Surface Runoff for Individual Storms[M]. US Department of Agriculture, Washington D C, 1949: 20-25.
- [27] 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.
- [28] 汪涛, 朱波, 罗专溪, 等. 紫色土坡耕地径流特征试验研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(6): 30-34.
- Wang Tao, Zhu Bo, Luo Zhuanxi, et al. Runoff characteristic of slope cropland in the hilly area of purple soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(6): 30-34. (in Chinese with English abstract)
- [29] 傅斌. 紫色土坡耕地降雨产流过程与模拟[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008.
- Fu Bin. The Process and Simulation of Runoff Generation on Purple Soil Crop Land[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [30] 王全九, 穆天亮, 王辉. 坡度对黄土坡面径流溶质迁移特征的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(4): 176-179.
- Wang Quanjiu, Mu Tianliang, Wang Hui. The effects of slope on solute concentration in runoff on the loess slope[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(4): 176-179. (in Chinese with English abstract)
- [31] Kirkby M J. Hillslope Hydrology[C]//New York: John Wiley & Sons, 1978: 227-289.
- [32] 陈一兵, Kim Troubowst. 紫色土渗透性的对比研究[J]. 水土保持通报, 1997, 17(2): 11-13.
- Chen Yibing, Troubowst K. Comparative study on permeability of purple soil[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1997, 17(2): 11-13. (in Chinese with English abstract)
- [33] 傅涛. 三峡库区坡面水土流失机理与预测评价建模[D]. 重庆: 西南农业大学, 2002.
- Fu Tao. A Study on Mechanism and Prediction Model of Hillslope Water and Soil Loss in Three Gorges Area[D]. Chongqing: Southwest Agricultural University, 2002. (in Chinese with English abstract)
- [34] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004: 131-152.
- Rui Xiaofang. Principle of Hydrology[M]. Beijing: China Water Power Press, 2004: 131-152. (in Chinese with English abstract)
- [35] Mishra S K, Sahu R K, Eldho T I, et al. An improved Ia-S relation incorporating antecedent moisture in SCS-CN methodology[J]. Water Resources Management, 2006, 20(5): 643-660.
- [36] Woodward D E, Hawkins R H, Jiang R, et al. Runoff curve number method: Examination of the initial abstraction ratio[C]//Philadelphia: World Water and Environmental Resources Congress, 2003: 1-10.
- [37] Miyazaki T. Water Flow in Soils[M]. New York: Marcel Dekker, Inc, 1993:245.
- [38] 傅斌, 王玉宽, 朱波, 等. 紫色土坡耕地降雨入渗试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(7): 39-43.
- Fu Bin, Wang Yukuan, Zhu Bo, et al. Experimental study on rainfall infiltration in sloping farmland of purple soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(7): 39-43. (in Chinese with English abstract)
- [39] 刘刚才, 林三益, 刘淑珍. 四川丘陵区常规耕作制下紫色土径流发生特征及其表面流数值模拟[J]. 水利学报, 2002, 33(12): 101-108.

Liu Gangcai, Lin Sanyi, Liu Shuzhen. Characteristics of runoff generation and its numerical simulation of surface flow in hilly area with purple soil under conventional tillage systems[J]. Journal of hydrology engineering, 2002, 33(12): 101–108. (in Chinese with English abstract)

[40] 丁文峰, 张平仓, 王一峰. 紫色土坡面壤中流形成与

坡面侵蚀产沙关系试验研究[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(3): 14–17.

Ding Wenfeng, Zhang Pingcang, Wang Yifeng. Experimental study on runoff and sediment yield characteristics on purple soil slope[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, 25(3): 14–17. (in Chinese with English abstract)

Runoff estimation in hillslope cropland of purple soil based on SCS-CN model

Chen Zhengwei^{1,2,3}, Liu Xingnian¹, Zhu Bo^{2,3*}

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041,

China; 3. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China)

Abstract: Overland runoff is a main factor causing soil erosion on hillslope, and runoff modeling is an effective way to predict soil erosion for conservation of the hillslope cropland of purple soil. The model of Soil Conservation Service-curve number (SCS-CN) is widely used for predicting direct runoff discharge based on measured rainfall, and also used as a runoff-estimating component of more complex watershed models. As a basic input parameter in the SCS-CN model, the curve number greatly affects the predictive value of runoff depth, and the initial abstraction ratio (λ) that was assumed to be 0.2 in the original development of SCS-CN model. When applied in the hillslope areas, few attempts have been made to incorporate a slope gradient factor into the CN method although slope gradient exerts great influence on discharge of overland runoff according to relevant studies. In addition, the initial abstraction ratio is considered to be a constant in many applications, although lots of studies revealed that variations of the ratio exist in different conditions. In this study, the relationship between runoff and slope gradient was revealed by analyzing observed data of 5 rainfall-runoff events in 2013 from experimental plots with slopes varying from 6.5° to 25°. The existing approaches integrating slope gradient factor in the SCS-CN model were directly evaluated for simulating the rainfall-induced runoff in the hillslope cropland of purple soil. Meanwhile, the initial abstraction ratio was optimized considering the influence of rainfall volume. The Nash-Sutcliffe efficiency (E) and relative error (RE) were used in the simulation results evaluation. The results indicated that the observed discharge of runoff increased obviously with the increase of slope gradient in a rainfall event, and the runoff discharge achieved maximum at a critical slope. For our experimental conditions, the slope-modified SCS-CN method proposed by Williams overestimated the runoff depths with Nash-Sutcliffe efficiency (E) of 0.76. The initial abstraction ratio (λ) of 0.2 was applicable to estimate small rainfall-runoff events based on the equation proposed by Huang. For the large rainfall-runoff events, the slope-adjusted CN method put forward by Huang performed better with increasing initial abstraction ratio (λ). It appeared to be appropriate for overland runoff prediction in hillslope cropland of purple soil when the value of λ was equal to 0.3 in the case of large rainfall-runoff events, according to the values of Nash-Sutcliffe efficiency ($E=0.99$) and mean relative error (RE=7.42%). Runoff discharge observed and estimated by the modified model achieved relatively good agreement in each rainfall-runoff event with mean relative error of 7.58%, 7.93%, 8.92%, 5.98%, and 7.13%, respectively. The results also revealed that the validated curve numbers calculated from the equation developed by Huang were 78.23, 78.45, 78.77, 79.11, and 79.47 for each slope gradient from 6.5° to 25°, respectively. This study provides valuable information for rainfall-runoff estimation and soil and water conservation in the hilly area of purple soil.

Key words: runoff; optimization; precipitation; slope gradient; soil conservation service-curve number (SCS-CN) model; validation; curve number; initial abstraction ratio

(责任编辑: 曾懿婷)