

# 动态参数 SCS-RF 模型在黄土丘陵区小流域产流模拟中的应用

赵雪花, 张丽娟, 祝雪萍

(太原理工大学水利科学与工程学院, 太原 030024)

**摘要:** 降雨特征对产流过程有重要影响, 而 SCS (Soil Conservation Service) 模型作为产流模拟的工具并未考虑该影响。SCS 模型参数的选取直接影响产流过程的模拟精度, 而目前在黄土丘陵沟壑区鲜有在率定该模型参数时考虑降雨特征的相关研究。该研究基于王家沟流域及其子流域汛期共计 307 场降雨-径流数据, 通过 RF (Random Forest) 算法, 将降雨特征作为决策树的分裂属性, 以此确定模型参数径流曲线数 (Curve Number, CN) 和初损率, 提出动态参数 SCS-RF 模型, 并与未进行参数改进的 SCS 模型进行对比。结果表明: SCS-RF 模型与 SCS 模型验证集均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 分别为 1.06 和 6.64, 纳什效率系数 NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency) 分别为 0.84 和 -8.65, 且 SCS-RF 模型在各流域模拟效果均达到良好级别, SCS-RF 模型模拟效果明显优于 SCS 模型。SCS-RF 模型在率定参数时考虑了降雨特征对产流的影响, 简化了参数率定过程的同时具有良好的地区适用性。流域不同治理措施使得参数分布取值存在明显差异, 流域经过水土流失治理后初损率取值均小于标准值 0.2。各流域 CN 与降雨量呈明显的负相关关系, 参数与降雨特征 (降雨量、30 min 降雨强度) 的数据分布均有相对明显的集中区域。

**关键词:** 模型; 径流; SCS-RF; 产流模拟; 动态参数; 黄土区

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.01.024

中图分类号: TV121

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-01-0195-08

赵雪花, 张丽娟, 祝雪萍. 动态参数 SCS-RF 模型在黄土丘陵区小流域产流模拟中的应用[J]. 农业工程学报, 2021, 37(1): 195-202. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.01.024 http://www.tcsae.org

Zhao Xuehua, Zhang Lijuan, Zhu Xueping. Runoff simulation of small watershed in loess hilly region using dynamic parameter SCS-RF model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(1): 195-202. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.01.024 http://www.tcsae.org

## 0 引言

降雨产流会引发水土流失、洪涝灾害等一系列问题<sup>[1]</sup>。径流形成主要受气候变化和人类活动等诸多因素的影响, 其中, 降雨为影响产流的决定性因素, 另外人类活动如水利工程、水土保持措施等改变了流域下垫面以及土壤入渗, 进而影响地表径流的产生与变化。黄土丘陵沟壑区垂直节理发育, 水土流失更为严重, 将会影响区域水土资源利用和防洪安全, 在此情况下, 进行黄土区降雨-径流模拟, 揭示两者之间的密切关系对水土保持规划、防洪减灾具有重要意义<sup>[2]</sup>。

降雨-径流过程十分复杂且受多种因素影响, 目前的专家学者多采用半经验降雨-径流模型进行径流模拟<sup>[3]</sup>。其中, 美国农业部研制的小流域水文模型 (Soil Conservation Service, SCS) 因其结构简单、参数少、所需资料便于获取, 且能反映土壤类型、土地利用、植被覆盖等流域特性对径流的影响<sup>[4]</sup>, 已广泛应用于水土流失治理、流域防洪、水质模拟及城市水文等众多领域<sup>[5-6]</sup>。SCS 模型有径流曲线数 CN (Curve Number) 和初损率  $\lambda$  这 2 个重要参数。CN 是反映不同土壤, 土地覆被利用情况下流域产流

能力的无量纲流域参数<sup>[7]</sup>, 径流对 CN 的取值十分敏感, CN 改变 10%, 径流计算结果会出现 -45%~55% 的变化。确定 CN 的方法通常为查表法和反推法。由于美国与中国下垫面差异较大, 基于美国农业小流域确定的 CN 检索表在中国适用性较差, 直接查表引用其数值应用于半干旱流域结果不理想, 模拟精度低<sup>[8]</sup>; 为了考虑不同时空尺度对 CN 的影响, 研究学者一般通过实测的降雨-径流资料反推 CN, 常用的反推法有最小二乘法、中位数法、平均值法、S 对数频率分布曲线法、渐近线法等方法<sup>[9-11]</sup>, 但上述方法模拟径流深的精度仍有待进一步提高, 目前尚无统一的 CN 计算方法。 $\lambda$  是计算径流峰值及时间分布的重要参数, 径流对  $\lambda$  十分敏感, 在干旱半干旱流域中更为明显。确定  $\lambda$  的常用方法为标准值法和反推法。标准值法为根据美国的实测资料,  $\lambda$  的取值定为 0.2, 但该值在不同地区的适用性和有效性是未知的; Baltas 等<sup>[12]</sup>利用希腊实验流域的资料得到,  $\lambda$  在该地区的平均值为 0.014; Shi 等<sup>[13]</sup>利用实测数据确定了三峡库区小流域  $\lambda$  的取值范围为 0.095~0.38; Huang 等<sup>[14]</sup>认为在黄土高原  $\lambda$  取 0.2 不合适; Fu 等<sup>[15]</sup>研究发现在黄土高原,  $\lambda=0.05$  时模拟效果优于标准值。可见,  $\lambda$  在不同流域取值不同。

以上研究用反推法确定 CN 和  $\lambda$  时, 考虑了区域化对参数的影响, 但如果参数确定方法主要是依据实测资料进行反推, 会出现“异参同效”的现象, 参数的唯一性与合理性难以确定<sup>[16-17]</sup>, 且现有文献对单一参数的优化率定研究较多, 两参数同时率定并结合机器学习算法的

收稿日期: 2020-07-31 修订日期: 2020-12-15

基金项目: 国家重点研发计划 (2019YFC0408601); 山西省重点研发计划项目 (201903D321052); 山西省自然科学基金 (201901D111060)

作者简介: 赵雪花, 博士, 教授, 主要从事水文水资源研究。

Email: zhaoxuehua@tyut.edu.cn

研究较少;另外 SCS 模型本身未考虑降雨强度和历时对径流的影响<sup>[18-19]</sup>,而降雨特征与产流过程、产流量等存在紧密的关系,因此限制了模拟精度;虽然 Hu 等<sup>[20]</sup>在 SCS 中引入降雨强度修正系数  $\gamma$  并与  $\lambda=0.2$  和  $\lambda=0.05$  时的 SCS 模型进行对比,结果表明 SCS- $\gamma$  方法的模拟精度更高,但其  $\lambda$  的选取具有一定的主观性。目前,鲜有文献在采用 SCS 模型时既考虑降雨强度、降雨历时等对产流的影响,又实现同时对 CN 和  $\lambda$  这 2 个参数进行优选确定。综上,本文充分考虑降雨特征和不同治理措施对产流的影响,采用机器学习算法—随机森林(Random Forest, RF)与 SCS 模型进行耦合,建立一种动态参数模型—SCS-RF,该模型可根据不同的降雨特征同时率定出本次降雨事件适用的产流参数 CN 和  $\lambda$ ,简化了参数的率定过程,为 SCS 模型应用于黄土丘陵沟壑区产流模拟提供一种新的思路。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

王家沟(WS1)流域位于山西省吕梁市离石区,东经  $110^{\circ}08' \sim 111^{\circ}12'$ ,北纬  $37^{\circ}32' \sim 37^{\circ}34'$ ,海拔 1 000~

1 320 m,气候类型为暖温带大陆性季风气候,属于黄土丘陵沟壑区第一副区,沟壑纵横,土质疏松,植被缺乏,水土流失严重。王家沟流域多年平均降雨量 510.2 mm,5—9 月(汛期)平均降雨量 419.6 mm,占年降雨量的 80.6%,汛期短历时暴雨较多,年平均气温  $9^{\circ}\text{C}$ ,多年平均水面蒸发量 1 700 mm,无霜期 150~170 d,多年平均径流深 15.2 mm。为了分析有无水土保持措施对小流域产流的影响,选择分水线相邻,流向一致,自然条件相似的同步对比观测小流域—羊道沟和插财主沟,羊道沟和插财主沟为王家沟流域的子流域。羊道沟(WS2)流域多年平均降雨量为 544.2 mm,汛期平均降雨量 390.6 mm,多年平均径流深 28.8 mm,完全未经治理,其地形地貌与土地利用方式均保持自然状态,农耕地占流域面积的 58%,水土流失的发生与发展按照自然规律进行。插财主沟(WS3)流域多年平均降雨量为 544.1 mm,汛期平均降雨量 391.0 mm,多年平均径流深 13.1 mm,治理前与羊道沟流域自然条件相似。流域从 1956 年开始进行集中综合治理并采取封禁措施,治理措施有梯田、地埂、造林、种牧草等,治理面积达到 78.3%。流域地貌基本情况及水土保持治理情况见表 1。

表 1 流域地貌基本情况及土地利用情况  
Table 1 Geography characteristics and land use of catchments

流域编号 Catchment ID	面积 Area/ $\text{km}^2$	平均比降 Average slope/%	长度 Length/km	土地利用 Land use		水土保持措施 Soil and water conservation measures			
				农耕地 Agricultural land/%	荒坡 Waste hillside/%	水平梯田 Bench terrace/%	地埂 Ridge/%	造林 Afforestation/%	其他 Other/%
WS1	9.10	2.70	5.90	60.55	36.55	13.19	7.18	44.35	5.73
WS2	0.21	12.60	0.75	58.00	42.00	—	—	—	—
WS3	0.19	11.90	0.78	65.20	34.80	7.70	45.20	5.10	20.30

### 1.2 数据来源

为研究 SCS-RF 模型的适用性,选取上述 3 个流域汛期实测降雨-径流资料,选用记录完整的实测资料,资料整编后进行了三性审查,真实可靠。其中,采用 WS1 流域 1955—1970 年共 124 场次降雨-径流资料;WS2 流域 1957—1970 年共 106 场次降雨-径流资料;WS3 流域 1956—1970 年共 77 场次降雨-径流资料。WS1 流域在沟口设置梯形堰和宽顶堰相配合的测流物,WS2 和 WS3 流域使用不完全式测流槽测流。依据实测降雨、径流数据分别计算各次降雨事件的前期影响雨量  $P_a$ 、历时  $T$ 、平均降雨强度  $\bar{I}$ 、30 min 降雨强度  $I_{30}$  等降雨特征值。

### 1.3 研究方法

本文综合考虑水土保持和降雨特征对产流的影响,通过在不同流域内开展参数取值研究,确定有无水土保持措施对产流的影响和面积不同的水土流失治理流域对产流的影响,具体差异情况通过 SCS-RF 模型进行径流模拟率定出的产流参数体现,参数率定过程中利用 RF 算法将降雨特征对产流的影响考虑在内。WS2 和 WS3 为面积、自然条件相近的对比流域,对比二者参数取值差异,分析有无水保措施对参数的影响。WS1 和 WS3 为面积不同,但治理度相近的流域,对比二者参数取值差异,分析面积不同的治理流域对参数的影响。

#### 1.3.1 SCS 模型

SCS 模型包括一个水量平衡方程(式(1))和 2 个基本假设(式(2)和式(3)):

$$P=I_a+F+R \quad (1)$$

$$\frac{F}{S}=\frac{R}{P-I_a} \quad (2)$$

$$I_a=\lambda S \quad (3)$$

式中  $P$  为次降雨量,mm;  $I_a$  为降雨初始损失量,mm;  $F$  为流域实际累积入渗量,即为后损,mm;  $R$  为径流深,mm;  $S$  为流域最大蓄水能力,mm;  $\lambda$  为初损率。

由式(1)~式(3)得到模型产流计算式(4):

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

由于  $S$  值的变化幅度很大,不便于取值,因此引入一个无因次变量 CN,计算公式为:

$$\text{CN}=\frac{25\ 400}{254+S} \quad (5)$$

运用 SCS 模型模拟径流需要率定参数 CN 和  $\lambda$ ,本文采用 RF 算法实现同时率定 2 参数。

#### 1.3.2 RF 算法

RF 算法<sup>[21]</sup>是并行式集成学习 Bagging 与随机子空间

相结合的算法，通过构建决策树形成基学习器。首先，对初始训练数据集进行随机且有放回的 Bootstrap sampling 自助抽样，抽样数据形成多个训练数据子集，子集与初始训练数据集包含的样本大小一致，RF 算法的抽样方法使得训练数据集随机多样化。然后，从属性集中随机选择属性作为决策树的分裂属性，根据划分准则确定决策树节点最优分裂属性，在训练数据子集的基础上建立决策树，对应训练出一个基学习器。基于上述过程，RF 算法中训练数据集和属性集合“随机”构建，每棵决策树独立生长，将训练数据和相应的属性集合作为输入，经过基学习器的模拟，输出结果，最终平均各基学习器的输出值得到最终结果。

### 1.3.3 动态参数 SCS-RF 模型

为使模型训练和验证数据具有代表性，根据研究区降雨特点，按照《降水量等级》（GB/T 28592-2012）中

对降雨的等级划分，可划分为小雨、中雨、大雨和暴雨 4 个等级，选取各流域 80% 的次降雨-径流数据组成训练集，用于训练 SCS-RF 模型，剩余数据组成验证集，训练集和验证集中均包含上述各降雨量等级的数据。

本文将与产流相关的降雨特征指标：降雨量  $P$ 、前期影响雨量  $P_a$ 、历时  $T$ 、平均降雨强度  $\bar{I}$ 、 $I_{30}$  作为属性集合构建决策树，将参数 CN 和  $\lambda$  作为模拟对象，参考相似地区参数取值研究，CN 取值范围设定为 1~100， $\lambda$  取值范围设定为 0.01~0.30。进行模型训练时，通过遍历法以最小绝对误差为标准确定最优参数并用于模型训练，当输入模型的场次降雨特征不同时，参数随之发生变化，基于此实现动态参数构建过程。将场次降雨的各个特征作为输入，通过动态参数 SCS-RF 模型，输出本场降雨的参数 CN 和  $\lambda$ ，并将计算所得的参数输入 SCS 模型进行产流模拟，确定出不同降雨特征下的场次降雨适用的参数组合。具体流程见图 1。

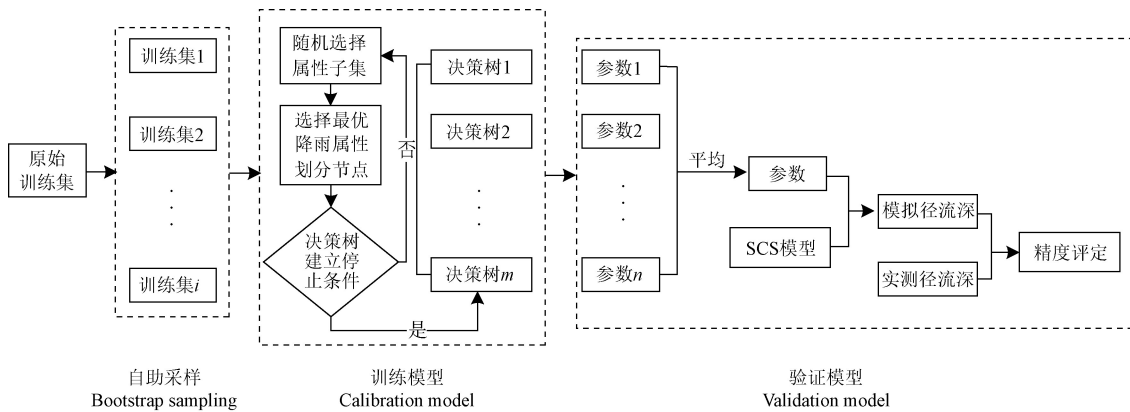


图 1 动态参数 SCS-RF 模型流程图

Fig.1 Flow chart of dynamic parameters Soil Conservation Service- Random Forest (SCS-RF) model

### 1.3.4 模型评价指标

为了衡量模型的模拟效果，选取以下评价指标对模型进行评定。分别选用均方根误差（Root Mean Square Error, RMSE）、纳什效率系数 NSE（Nash-Sutcliffe Efficiency）和实测值变异性大于平均误差的次数（ $n_t$ ）作为模型评价指标。其中 RMSE 越接近 0、NSE 越接近于 1、 $n_t$  越高，模型模拟效果越好。NSE 计算式见式（6）：

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (R_{obs} - R_{sim})_i^2}{\sum_{i=1}^N (R_{obs} - \bar{R}_{obs})_i^2} = 1 - \left( \frac{RMSE}{SD} \right)^2 = 1 - \left( \frac{1}{n_t + 1} \right)^2 \quad (6)$$

其中

$$n_t = \frac{SD}{RMSE} - 1 \quad (7)$$

式中  $R_{obs}$  为实测径流深，mm； $\bar{R}_{obs}$  为实测径流深均值，mm； $R_{sim}$  为模拟径流深，mm； $N$  为降雨场次总次数， $i$  为从 1 至  $N$  的整数，SD 为标准差。参考文献[22]，以  $n_t$  和 NSE 指标为基础的评价结果分级标准见表 2。

表 2 模型拟合优度评价标准

Table 2 Model goodness of fit evaluation criteria

评定等级 Performance rating	$n_t$	NSE
满意 Very good	$\geq 2.2$	$\geq 0.90$
良好 Good	[1.2, 2.2)	[0.80, 0.90)
接受 Acceptable	[0.7, 1.2)	[0.65, 0.80)
不可接受 Unsatisfactory	$< 0.7$	$< 0.65$

注： $n_t$  为实测值变异性大于平均误差的次数；NSE 为纳什效率系数。

Note:  $n_t$  is the time that the variation of the measured value is greater than the mean error; NSE: Nash-Sutcliffe Efficiency.

## 2 结果与讨论

### 2.1 SCS-RF 模型参数计算结果

#### 2.1.1 参数计算结果

SCS-RF 模型将  $P$ 、 $P_a$ 、 $T$ 、 $\bar{I}$  和  $I_{30}$  这些降雨特征对径流的影响综合考虑在参数中，而土地利用、土壤类型、植被、坡度等流域下垫面因素对参数的影响则包含在选取的代表流域中。对 WS1、WS2 和 WS3 各流域分别通过训练 SCS-RF 模型，得到验证集场次降雨对应的参数取值分布区间，如图 2 所示。CN 和  $\lambda$  的取值分布区间在不同流域之间存在明显差异，就 CN 而言，WS1 中取值范围最大，在各区间占比较均匀；WS2 中 CN 值分布范围

最小,且在 60 以上;WS3 中 CN 取值范围与 WS1 相似,其取值 50 以上的数据占总数的 87%。WS1 中  $\lambda$  取值范围较小,柱状图呈正态分布趋势;WS2 中  $\lambda$  取值范围最大,且在 0.08 以上;WS3 中  $\lambda$  值范围较其余 2 个流域明显减小,且有 79% 的  $\lambda$  小于 0.08,与 WS2 相比,二者的  $\lambda$  取值范围不存在交集,进行水土流失治理后  $\lambda$  明显减小,与 WS1 相比,二者存在交集,同样进行治理的前提下,随着面积减小, $\lambda$  位于 0.04~0.10 区间相较于 WS1 增加 29%。

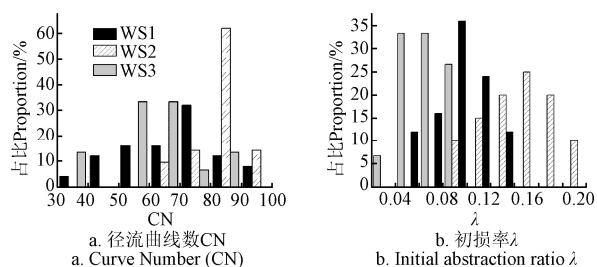


图2 SCS-RF 模型验证集参数取值分布

Fig.2 Distribution of parameter value for SCS-RF model in validation

对训练集和验证集确定的参数进行分析,如图 3 所示,各流域 CN 均值小于中位数,为左偏分布;各流域  $\lambda$  均值略大于中位数,仅 WS1 中  $\lambda$  在 0.05 的显著性水平下通过 Shapiro-Wilk 检验,为正态分布。

相同治理条件下,流域面积不同,所确定的参数不同。对于综合治理流域 (WS1、WS3),其 CN 的分布形式相似,但面积大的流域 WS1 中 CN 波动程度较大,WS1 中位于 70~90 内的 CN 比 WS3 增加 53%,WS1 中 CN 取值普遍较大。 $\lambda$  同样在面积大的流域波动程度较大,面积大的 WS1 中  $\lambda$  取值普遍较大,WS1 中位于 0.06~0.12 内的  $\lambda$  比 WS3 增加 133%,WS1 和 WS3 中  $\lambda$  均小于标准值 0.2。

有无水土保持措施治理的对比观测流域 (WS2、WS3) 参数分析,未治理流域 WS2 的 CN 波动程度较小,WS2 中位于 70~90 内的 CN 比 WS3 增加 144%,CN 取值普遍较大; $\lambda$  值在两流域的分布形式相似,WS2 中  $\lambda$  值有 88.7% 的  $\lambda$  小于 0.2;WS3 中  $\lambda$  有 75% 的数据位于 0.02~0.08,治理流域 WS3 中  $\lambda$  的波动程度变小。

黄土丘陵沟壑区地表植被稀疏,地形支离破碎,地下水位低,SCS 模型适用于黄土区的产流计算,因此在该地区开展了大量相关研究。周淑梅等<sup>[23]</sup>确定桥子西沟流域  $\lambda$  为 0.1,并得出应利用当地数据率定研究区  $\lambda$  的结论;王英等<sup>[24]</sup>对黄土区径流小区进行参数优化研究,优化后  $\lambda$  取值 0.01。以上研究表明  $\lambda$  取值均小于 0.2,这与本文确定出大部分  $\lambda$  取值小于 0.2 的结论一致,但以上研究得到的参数均为流域统一的参数,不能根据不同类型降雨特征得到适用的参数。水土保持措施改变了微地形与植被,加大降雨拦蓄、降低降雨侵蚀、提高降雨入渗,对径流和流域蓄水能力都有较大影响<sup>[25]</sup>。黄土区小流域的治理措施和空间配置方式均会导致率定的参数间存在差异。

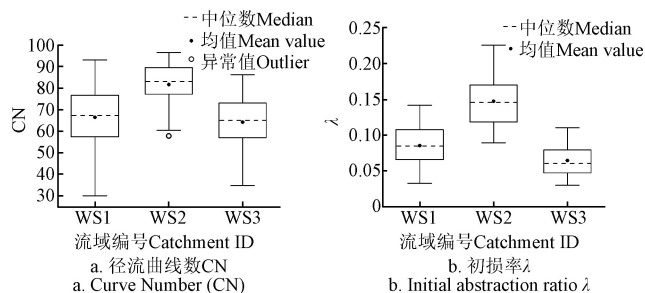


图3 SCS-RF 模型参数统计结果

Fig.3 Statistical results of SCS-RF model parameters

## 2.1.2 参数 CN 和 $\lambda$ 与降雨特征的关系

黄土高原位于季风区和非季风区的过渡带,夏秋季雨量集中,降雨和当地条件气候密切相关,以超渗产流为主。研究表明,黄土丘陵沟壑区的降雨过程中,以  $P$  和  $I_{30}$  为代表的降雨特征与产流、产沙的关系最为密切<sup>[26-27]</sup>。本文的研究结果与上述结论一致,因此只选择相关性较大的  $P$  和  $I_{30}$  降雨特征结合参数进行分析。由表 3 可知,在显著性水平 0.01 时,3 个流域中  $P$  与 CN 均表现为显著相关,CN 随着  $P$  的增加逐渐减小,呈明显的负相关关系。WS1 中  $P$  与  $\lambda$  显著相关,呈弱相关关系。WS2 中 CN 与  $I_{30}$  显著相关,同样呈弱相关关系。WS3 中  $I_{30}$  和  $\lambda$  显著相关,呈中等程度相关关系。

表3 典型降雨特征与参数的皮尔逊相关分析  
Table 3 Pearson correlation analysis of typical rainfall characteristics and parameters

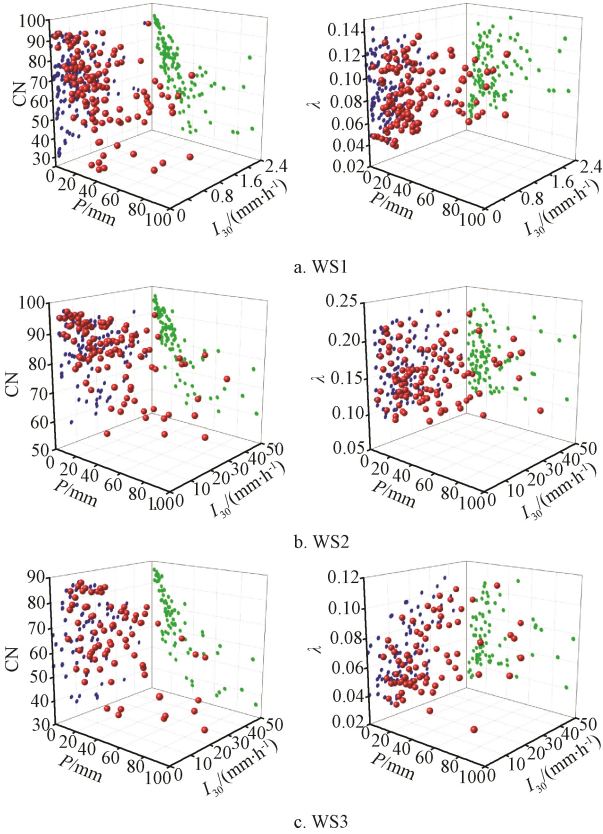
项目 Items	WS1		WS2		WS3	
	CN	$\lambda$	CN	$\lambda$	CN	$\lambda$
$P$	-0.634*	0.342**	-0.735**	0.062	-0.725**	0.149
$I_{30}$	0.024	-0.102	-0.261**	-0.006	-0.050	0.538**

注: \*\*表示在显著性水平为 0.01 时显著相关。 $P$  为降雨量,  $I_{30}$  为 30 min 降雨强度,下同。

Note: \*\* indicates a significant correlation at the significance level of 0.01.  $P$  is rainfall, and  $I_{30}$  is rainfall intensity in 30 min, same as below.

如图 4a 所示,WS1 中  $P$  介于 0~20 mm,且  $I_{30}$  介于 0~0.8 mm/h 时,CN 取值范围为 52.89~93.06,有 82% 的 CN 取值大于 65, $\lambda$  取值范围为 0.03~0.13,有 84% 的  $\lambda$  取值介于 0.05~0.15; $P$  介于 20~40 mm,且  $I_{30}$  介于 0~0.8 mm/h 时,CN 取值范围为 30.07~73.62,有 82% 的 CN 取值大于 40, $\lambda$  取值范围为 0.05~0.13,均位于 0.05~0.15 区间内,有 68% 的  $\lambda$  取值介于 0.05~0.10。如图 4b 所示,WS2 中  $P$  介于 0~20 mm,且  $I_{30}$  介于 0~30 mm/h 时,CN 取值范围为 69.86~96.58,有 94% 的 CN 取值大于 80, $\lambda$  取值范围为 0.09~0.23,有 84% 的  $\lambda$  取值介于 0.10~0.20; $P$  介于 20~40 mm,且  $I_{30}$  介于 0~30 mm/h 时,CN 取值范围为 57.76~85.11,有 71% 的 CN 取值介于 60~80, $\lambda$  取值范围为 0.09~0.21,有 86% 的  $\lambda$  取值介于 0.10~0.20。如图 4c 所示,WS3 中  $P$  介于 0~20 mm,且  $I_{30}$  介于 0~30 mm/h 时,CN 取值范围为 48.75~86.26,有 81% 的 CN 取值大于 60, $\lambda$  取值范围为 0.03~0.10,有 91% 的  $\lambda$  取值介于 0.04~0.10; $P$  介于 20~40 mm,且  $I_{30}$

介于 0~30 mm/h 时, CN 取值范围为 36.51~72.96, 有 78% 的 CN 取值大于 50;  $\lambda$  取值范围为 0.05~0.10, 有 50% 的  $\lambda$  取值介于 0.06~0.10。可见, 不同治理措施的流域, 降雨特征  $P$  和  $I_{30}$  不同, 率定的参数 CN 和  $\lambda$  是在动态变化的。得出不同降雨特征区间的 2 参数取值范围, 为流域产流模拟提供数据参考。



注: 红色点位置由 3 个变量决定, 蓝色点是参数和  $I_{30}$  轴组成平面上的投影点, 绿色点是参数和  $P$  轴组成平面上的投影点。  
Note: Red balls: points depending on the three variables; Blue balls: projection pf points over the plane composed of  $I_{30}$  and CN or  $\lambda$  axis; Green balls: projection of points over the plane composed of  $P$  and CN or  $\lambda$  axis.

图 4 SCS-RF 模型参数与典型降雨特征的关系  
Fig.4 Relationship between SCS-RF model parameters and rainfall characteristics

2.2 SCS 模型参数选取结果

动态参数 SCS-RF 模型本质上是在不改变 SCS 模型基本计算结构的前提下, 采用 RF 算法改进 SCS 模型参数率定方法。为验证 SCS-RF 模型的适用性和模拟效果, 选用反推参数率定方法的 SCS 模型与 SCS-RF 模型进行对比。由于 NEH-4 (National Engineering Handbook chapter 4) 中提供的参数 CN 表是根据美国农业小流域得出的经验值, 而黄土丘陵沟壑区的水文条件和土壤类型与美国不同, 因此采用 NEH-4 中推荐的最小二乘法 LSM (Least-Squares Method) [28] 反推参数 CN。根据实测降雨-径流数据采用 LSM 计算各流域参数 CN, 忽略除  $P$  以外其它降雨特征的影响, 仅考虑降雨量对该流域产流的影响, CN 取反推出的定值, 不随降雨特征改变;  $\lambda$  统一采用标准值 0.2。用 SCS 模型反推可得 WS1、WS2、WS3 的 CN 分别为: 72.26、77.54、

66.82, WS2 的 CN 最大, WS3 的 CN 最小。为便与 SCS-RF 模型区分, 下文所述 SCS 模型均表示使用 LSM 确定参数后的 SCS 模型。

2.3 模型模拟评价结果

在 3 个流域中分别使用 SCS-RF 和 SCS 模型进行产流模拟, 验证集评价结果表明: SCS-RF 模型均达到良好级别, 而 SCS 模型均为不可接受级别, 使用 SCS-RF 模型进行小流域产流模拟时精度较高, 适用性良好, 可使用 SCS-RF 模型作为黄土丘陵沟壑区小流域产流模拟的研究方法。综合各个指标及评价分级结果, SCS-RF 模型相较于 SCS 模型明显可获得良好的模拟效果, 使用 RF 算法确定参数较为合理。验证集模型具体评价结果见表 4。SCS-RF 模型和 SCS 模型验证集 NSE 分别为 0.84 和 -8.65。

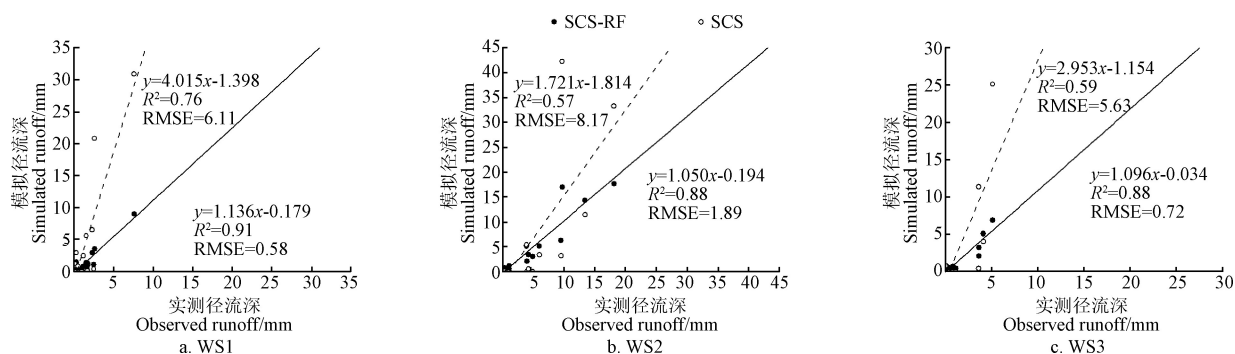
表 4 各流域验证集模型评价结果  
Table 4 Evaluation results of model simulation in the validation of each catchments

评价指标 Criteria	WS1		WS2		WS3	
	SCS-RF	SCS	SCS-RF	SCS	SCS-RF	SCS
$n_t$	1.67	-0.75	1.58	-0.40	1.39	-0.69
NSE	0.86	-14.48	0.85	-1.80	0.82	-9.67
等级 Rating	良好	不可接受	良好	不可接受	良好	不可接受

SCS-RF 模型训练集各流域模拟结果也均达到良好级别, 验证集和训练集的模拟精度相似, 表明 SCS-RF 具有较好的泛化性能, 不易陷入过拟合, 这是由于 RF 算法中样本和属性扰动使基学习器具有多样性, 使得模型泛化性能得到提升。SCS 模型中并未考虑  $T$ 、 $\bar{I}$  等降雨特征对径流的影响, 但这些与降雨有关的动态性质导致了复杂的降雨-径流关系, 同时影响着降雨-径流关系, 而单一参数并不能体现这种关系[29]。SCS 模型根据实测资料进行参数计算具有经验统计性, 并不能拟合全部的径流过程, 因而会造成模拟精度不高的结果。采用 SCS-RF 模型可有效提高模拟精度和地区的适用性, 通过训练模型, 将模型参数和降雨特征结合在一起, 并作为模型模拟对象, 得出不同降雨条件和流域土壤干湿状况下场次降雨的模型参数, 参数能够反映出流域一定的产流成因机制, 因此采用 SCS-RF 进行产流模拟时效果明显优于 SCS 模型。

验证集实测径流深与模拟径流深对比如图 5 所示, SCS-RF 模型和 SCS 模型的 RMSE 分别为 1.06 和 6.64。SCS 模型模拟径流深所得相关系数明显小于 SCS-RF 模型, 验证集 77.0% 的 SCS 模型模拟值小于实测值。采用 SCS 模型的模拟结果不理想, 这是由于不同场次降雨均采用同一参数所致。首先, 较小的  $P$  对 CN 有高偏置作用[30], 而实际中黄土丘陵区降雨量通常较小, WS1、WS2、WS3 中  $P>25.4$  mm 的次降雨事件分别占总场次的 36.5%、24.3%、27.3%。其次,  $\lambda$  统一取为 0.2, 导致 SCS 模型中  $P<I_a$  的情况普遍发生, 验证集内 61 场次降雨中产流模拟结果为 0 的情况占总数 56%, 而 SCS-RF 模拟结果均大于 0, 参数与当地降雨特征不匹配是产生误差, 造成 SCS 模型模拟与实测值差别较大的主要原因。





注: 虚线为 SCS 模型拟合线, 实线为 SCS-RF 模型拟合线

Note: The dotted line is the fitting line of SCS model, and the solid line is the fitting line of SCS-RF model.

图 5 径流深实测值与模拟值对比

Fig.5 Simulated runoff and observed runoff

### 3 结论

Soil Conservation Service (SCS) 模型在实际应用时存在许多限制, 模型并未考虑降雨特征对径流的影响, 同时模型参数也存在地区不适用的问题, 本研究提出了动态参数 SCS-RF (Random Forest) 模型, 并在黄土丘陵沟壑区典型小流域进行适用性研究, 得到以下结论:

1) 为了克服 SCS 模型没有考虑降雨强度、降雨历时等降雨特征的缺点, 结合机器学习中的 RF 算法, 构建动态参数 SCS-RF 模型, 将降雨特征作为属性集, 通过训练数据同时获得不同降雨特征下场次降雨的 2 个参数。采用 SCS-RF 模型在王家沟流域、羊道沟流域、插财主沟流域进行产流模拟时均能取得良好的效果, 且效果明显优于 SCS 模型。SCS-RF 模型考虑不同类型降雨特征对产流的影响, 不同场次降雨使用不同的参数, 提高了模型模拟精度, 因此模拟效果优于 SCS 模型。

2) 不同流域的径流曲线数 (Curve Number, CN) 和初损率  $\lambda$  取值分布存在明显差异, 对比进行综合治理但面积不同的 2 个流域, CN 的分布形式近似, 面积较大的王家沟流域 CN 和  $\lambda$  取值波动程度大, 且取值较大。对比面积近似, 未进行治理的羊道沟流域和综合治理的插财主沟流域, 羊道沟流域 CN 取值波动程度较小, 而  $\lambda$  取值波动程度较大, CN 和  $\lambda$  取值较其他流域普遍较大。经过水土流失治理后的流域  $\lambda$  取值均小于标准值 0.2, 黄土丘陵沟壑区  $\lambda$  的适宜取值小于 0.2。

3) 各流域 CN 与降雨量  $P$  呈显著的负相关关系, 参数与典型降雨特征 ( $P$ 、30 min 降雨强度  $I_{30}$ ) 的数据分布均有相对明显的集中区域, 在实际应用中, 可根据降雨特征 ( $P$ 、 $I_{30}$ ) 和参数的分布范围估计适宜的参数取值。

#### [参 考 文 献]

- [1] 黄金柏, 付强, 王斌, 等. 黄土高原北部水蚀风蚀交错带坡面降雨分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 108-114.  
Huang Jinbai, Fu Qiang, Wang Bin, et al. Rainfall analysis on slope land of wind-water erosion crisscross region in northern Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011,

27(8): 108-114. (in Chinese with English abstract)

- [2] Verma S, Verma R K, Mishra S K, et al. A revisit of NRCS-CN inspired models coupled with RS and GIS for runoff estimation[J]. Hydrological Sciences Journal, 2017, 62(12): 1891-1930.
- [3] Grimaldi S, Petroselli A, Romano N. Green-Ampt Curve-Number mixed procedure as an empirical tool for rainfall-runoff modelling in small and ungauged basins[J]. Hydrological Processes, 2013, 27(8): 1253-1264.
- [4] 李润奎, 朱阿兴, 陈腊娇, 等. SCS-CN 模型中土壤参数的作用机制研究[J]. 自然资源学报, 2013, 28(10): 1778-1787.  
Li Runkui, Zhu Axing, Chen Lajiao, et al. Effects of soil parameters in SCS-CN runoff model[J]. Journal of Natural Resource, 2013, 28(10): 1778-1787. (in Chinese with English abstract)
- [5] Xu J, Yi Z, Zhong K, et al. Coupling modified linear spectral mixture analysis and Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) models to simulate surface runoff: Application to the main urban area of Guangzhou, China[J]. Water, 2016, 8(12): 550.
- [6] Bartlett M S, Parolari A J, McDonnell J J, et al. Beyond the SCS-CN method: A theoretical framework for spatially lumped rainfall-runoff response[J]. Water Resources Research, 2016, 52(6): 4608-4627.
- [7] 焦剑, 宋伯岩, 王世雷, 等. 基于改进径流曲线数模型的北京密云坡地径流估算[J]. 农业工程学报, 2017, 33(21): 194-199.  
Jiao Jian, Song Boyan, Wang Shilei, et al. Runoff estimation for hillslope land in Miyun based on improved model of soil conservation service curve number[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(21): 194-199. (in Chinese with English abstract)
- [8] 吴志宜, 俞志强, 朱雪坚, 等. SCS 模型在不同土地类型地表产流计算中的应用[J]. 浙江大学学报 (理学版), 2016, 43(2): 226-230.

- Wu Zhiyi, Yu Zhiqiang, Zhu Xuejian, et al. Application of SCS model on computing the surface runoff of different land use type-A case study on Yuyao, Zhejiang Province[J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2016, 43(2): 226-230. (in Chinese with English abstract)
- [9] 王瑾杰, 丁建丽, 张成, 等. 基于 SCS 模型的新疆博尔塔拉河流域径流模拟[J]. 农业工程学报, 2016, 32(7): 129-135.
- Wang Jinjie, Ding Jianli, Zhang Cheng, et al. Runoff simulation based on SCS mode in Bortala River Basin in Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(7): 129-135. (in Chinese with English abstract)
- [10] Shi W H, Wang N. Improved SMA-based SCS-CN method incorporating storm duration for runoff prediction on the Loess Plateau, China[J]. Hydrology Research, 2020, 51(3): 443-455.
- [11] 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.
- Fu Suhua, Wang Xiangliang, Wang Hongye, et al. Method of determining CN value in the SCS-CN method[J]. Arid Land Geography, 2012, 35(3): 415-421. (in Chinese with English abstract)
- [12] Baltas E A, Dervos N A, Mimikou M A. Technical Note: Determination of the SCS initial abstraction ratio in an experimental watershed in Greece[J]. Hydrology and Earth System Science, 2007, 11(6): 1825-1829.
- [13] 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.
- [14] Huang M, Gallichand J, Dong C, et al. Use of soil moisture data and curve number method for estimating runoff in the Loess Plateau of China[J]. Hydrological Processes, 2007, 21(11): 1471-1481.
- [15] Fu S H, Zhang G H, Wang L, et al. Initial abstraction ratio in the SCS-CN method in the Loess Plateau of China[J]. Transactions of the Asabe, 2011, 54(1): 163-169.
- [16] 高黎明, 张耀南, 冯起. 河西内陆河地区径流模型概述[J]. 冰川冻土, 2016, 38(1): 259-269.
- Gao Liming, Zhang Yaonan, Feng Qi. Summarizing the runoff simulation models in Hexi inland river basins[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(1): 259-269. (in Chinese with English abstract)
- [17] 芮孝芳, 蒋成煜, 张金存. 流域水文模型的发展[J]. 水文, 2006, 26(3): 22-26.
- Rui Xiaofang, Jiang Chengyu, Zhang Jincun. Development of watershed hydrologic models[J]. Journal of China hydrology, 2006, 26(3): 22-26. (in Chinese with English abstract)
- [18] Garen D C, Moore D S. Curve number hydrology in water quality modeling: Uses, abuses, and future directions[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2005, 41(2): 377-388.
- [19] Mishra S K, Singh V P, Singh P K. Revisiting the soil conservation service curve number method[C]//Singh V, Yadav S, Yadava R. Hydrologic Modeling. Singapore: Springer, 2018: 667-693.
- [20] Hu P C, Tang J L, Fan J H, et al. Incorporating a rainfall intensity modification factor gamma into the I-a-S relationship in the NRCS-CN method[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2020, 8(3): 237-244.
- [21] Breiman L. Random Forests[J]. Machine Learning, 2001, 45(1): 5-32.
- [22] Ritter A, Muñoz-Carpena R. Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments[J]. Journal of Hydrology, 2013, 480: 33-45.
- [23] 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.
- Zhou Shumei, Lei Tingwu. Calibration of SCS-CN initial abstraction ratio of a typical small watershed in the Loess Hilly-Gully region[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(20): 4240-4247. (in Chinese with English abstract)
- [24] 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.
- Wang Ying, Huang Mingbin. Optimizing parameters of SCS-CN method for application on the Loess Plateau[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(1): 54-58. (in Chinese with English abstract)
- [25] 王红艳, 张志强, 查同刚, 等. 径流曲线数 (SCS-CN) 模型估算黄土高原小流域场降雨径流的改进[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(8): 71-79.
- Wang Hongyan, Zhang Zhiqiang, Zha Tonggang, et al. Modification of SCS-CN model for estimating event rainfall runoff for small watersheds in the Loess Plateau, China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(8): 71-79. (in Chinese with English abstract)
- [26] Fang H Y, Cai Q G, Chen H, et al. Effect of rainfall regime and slope on runoff in a gullied loess region on the Loess Plateau in China[J]. Environmental Management, 2008, 42(3): 402-411.
- [27] Wei W, Chen L, Fu B, et al. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China[J]. Journal of Hydrology, 2007, 335(3/4): 247-258.
- [28] Hawkins R H, Ward T J, Woodward D E, et al. Curve Number Hydrology: State of the Practice[M]. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2009.

- [29] Muche M E, Hutchinson S L, Hutchinson J M S, et al. Phenology-adjusted dynamic curve number for improved hydrologic modeling[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 235: 403-413.
- [30] D'asaro F, Grillone G. Empirical investigation of curve number method parameters in the mediterranean area[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2012, 17(10): 1141-1152.

## Runoff simulation of small watershed in loess hilly region using dynamic parameter SCS-RF model

Zhao Xuehua, Zhang Lijuan, Zhu Xueping

(College of Water Resources Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** Rainfall and runoff events are two important parameters in the natural hydrological cycle. The rainfall also dominates the formation of runoff in many influence factors. In recent years, various human activities, such as the construction of projects for water conservancy, as well as conservation projects for soil sources, have posed a great impact on the soil infiltration and topography of basin, which further affected the evolution of surface runoff. Heavy rain and runoff can cause a series of natural disasters, such as water erosion and flood damage. Sediment loss from construction sites and soil erosion has become a serious source of water pollution in the loess hilly and gully area. The rapid situation can deeply deteriorate the water and soil resources, further to threaten the safety of flood control. Fortunately, Soil Conservation Service (SCS) model can be used to evaluate the impact of rainfall on runoff yield. The improved model was established to consider the impact of other rainfall characteristics in the supposed conditions and internal structure with the parameter calibration. However, the accuracy of runoff simulation depends mainly on the selection of model parameters, particularly on the regional characteristics of parameters. In this study, a dynamic parameter SCS-Random Forest (RF) model was constructed, according to the dataset from 307 times rainfall runoff in Wangjiagou basin and its sub basins in flood season. The rainfall characteristics were taken as splitting attributes of a decision tree, while the RF was used to determine the Curve Number (CN) and initial abstraction ratio in the model parameters. Various parameters were calibrated, according to the rainfall characteristics of a same rainfall, and then compared with the SCS model without parameter improvement. The results showed that the Root Mean Square Error (RMSE) of SCS-RF model and SCS model were 1.06 and 6.64, while the Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) were 0.84 and -8.65, respectively. Moreover, the SCS-RF model achieved an excellent performance in each basin, where the simulation effect of SCS-RF model was better than that of SCS model. The SCS-RF model also considered the influence of rainfall characteristics on runoff yield. The process of parameter calibration was simplified, thereby to enhance the universality of the model. The different treatment in the basin made the distribution of parameters significantly different from others. There was small fluctuation for the CN in Yangdaogou basin, and the initial abstraction ratio in the Chacaizhugou basin. The initial abstraction ratios were less than the standard value of 0.2, after the control of soil erosion. The distributions of CN were approximate, comparing with the two basins that were comprehensively treated but with different areas. Specifically, there was a large area fluctuation for the CN and initial abstraction ratio in the Wangjiagou basin, where the CN in Wangjiagou basin was larger than that of Chacaizhugou basin. The compared area was similar, where the Yangdaogou basin did not be treated, while the Chacaizhugou basin was treated. The initial abstraction ratio was small in the basin of Chacaizhugou, but fluctuated greatly in Yangdaogou basin, whereas, the CN fluctuation was small in Yangdaogou basin. It infers that the distribution of initial abstraction ratio was similar. There was a negative correlation between CN and rainfall  $P$  in each basin. The data distribution of parameters and rainfall characteristics ( $P$ , rainfall intensity in 30 min  $I_{30}$ ) had a relatively obvious concentration area. The rainfall-runoff simulation can provide a theoretical basis for the conservation planning of soil and water, as well as the management of water resources.

**Keywords:** models; runoff; SCS-RF; runoff simulation; dynamic parameters; loess region