基于修正 SCS－CN 模型集雨垄径流预测

赵武成[1]，王 琦[1]，王小赟[1]，赵晓乐[1]，张登奎[1]，周旭姣[1]，买小虎[2]，陈 瑾[3]

(1.甘肃农业大学草业学院，兰州 730070；2. 甘肃水务节水科技发展有限责任公司，
兰州 730000；3.定西市水土保持科学研究所，甘肃 定西 743000)

摘要：为了探寻半干旱区垄沟集雨种植控制水土流失和增产的机理，利用前 2 年(2012—2013 年)日降雨量、实测径流和修正 SCS—CN 模型，率定集雨垄的径流模型参数 *CN*、λ 和 α，然后利用后 3 年(2014—2016 年)日降雨量和实测径流资料检验该模型有效性，预测不同覆盖材料(土壤结皮、生物可降解地膜和塑料地膜)和不同垄宽(30，45，60 cm)集雨垄的径流量。结果表明，土壤结皮覆盖集雨垄、生物可降解膜覆盖集雨垄和塑料地膜覆盖集雨垄的 CN 取值范围分别为 82.0～82.9，97.9～98.8，98.3～99.9，λ 取值范围分别为 0.045～0.071，0.251～0.327，0.189～0.213，α 取值范围分别为 2.35～2.89，4.21～4.82，3.32～3.99。通过对模型有效性进行评价，土壤结皮覆盖集雨垄、生物可降解膜覆盖集雨垄和塑料地膜覆盖集雨垄的平均相对误差取值范围分别为 1.36%～3.41%，1.21%～3.42%，2.48%～5.42%，纳什效率取值范围分别为 0.97～0.98，0.97～0.98，0.96～0.98。日降雨量等级对修正 SCS—CN 模型参数 *CN*、λ 和 α 的影响不明显，不同覆盖材料之间的 *CN*、λ 和 α 差异远大于不同垄宽之间的 *CN*、λ 和 α 差异。修正 SCS—CN 模型集雨垄径流预测的相对误差满足要求(≤20%)，可信度较高(纳什效率≥0.95)，可以用于半干旱区集雨垄的径流预测，为控制水土流失和提高降水利用效率提供科学方法。

关键词：修正 SCS－CN 模型；集雨垄；径流预测

中图分类号：P333 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-2242(2021)02-0096-10

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.02.014

Runoff Prediction of Rainwater Harvesting Ridge Based on Modified SCS－CN Model

ZHAO Wucheng[1], WANG Qi[1], WANG Xiaoyun[1], ZHAO Xiaole[1],
ZHANG Dengkui[1], ZHOU Xujiao[1], MAI Xiaohu[2], CHEN Jin[3]

(1.*College of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou* 730070; 2.*Gansu Water Saving Technology Development Co., Ltd., Lanzhou* 730000; 3. *Dingxi Institute of Soil and Water Conservation, Dingxi, Gansu* 743000)

Abstract: In order to find the mechanism of soil erosion control and crop yield increase in ridge-furrow rainwater harvesting production in semi-arid regions of China, a modified SCS—CN model was used to estimate the runoff for ridges with 3 widths (30, 45, and 60 cm) and 3 different materials (soil crust, biodegradable film, and plastic film) based on the rainfall and runoff from 2012 to 2016. The parameters of *CN*, λ, and α in the modified SCS－CN model were calibrated according to the rainfall and runoff from 2012 to 2013, and the applicability of the modified SCS—CN model to rainwater harvesting ridges was evaluated using rainfall and runoff from 2014 to 2016. The results indicated that for ridges mulched with soil crust, biodegradable film, and plastic film, *CN* in the modified SCS—CN model ranged from 82.0 to 82.9, from 97.9 to 98.8, and from 98.3 to 99.9, respectively; The parameter of λ ranged from 0.045 to 0.071, from 0.251 to 0.327, and from 0.189 to 0.213, respectively; The parameter of α ranged from 2.35 to 2.89, from 4.21 to 4.82, and from 3.32 to 3.99, respectively; Mean relative error ranged from 1.36% to 3.41%, from 1.21% to 3.42%, and from 2.48% to 5.42%, respectively; the Nash—Sutcliffe efficiency ranged from 0.97 to 0.98, from 0.97 to 0.98, and from 0.96 to 0.98, respectively. Effects of classification of daily rainfall were not obvious on the parameters of *CN*, λ, and α in the modified SCS—CN model. The difference of *CN*, λ, and α between 3 different materials was greatly larger than that between 3 ridge widths. The Nash—Sutcliffe efficiency

收稿日期：2020-09-24
资助项目：国家自然科学基金项目(41661059)
第一作者：赵武成(1996—)，男，硕士研究生，主要从事半干旱区节水集雨与饲草栽培研究。E-mail：2505537631@qq.com
通信作者：王琦(1969—)，男，教授，博士生导师，主要从事半干旱区集雨灌溉研究。E-mail：wangqigsau@gmail.com

was higher than 0.95 and the relative error was lower than 10%. The results indicated that the modified SCS—CN model was applicable to runoff estimation for rainwater harvesting ridges and the model performance was acceptable. These findings may be helpful in controlling soil erosion and increasing rainwater use efficiency.

Keywords: modified SCS—CN model; rainwater harvesting ridge; runoff prediction

我国黄土高原丘陵沟壑区是世界上著名的干旱和水土流失严重区域之一，该区域存在长期连续性干旱、短期高强度降雨、稀疏植被、松散土壤、沟壑地形、不合理土地使用和管理（包括过度放牧、过度砍伐森林、单一耕作、坡耕地种植等）等特点[1-3]，属于典型雨养农业区和水土流失区。不利自然因素和人为因素通常引起降雨资源损失、土壤侵蚀、土壤营养元素流失、土壤退化等现象，进一步导致下游水灾和水资源污染等[4-6]。该地区多年潜在年蒸发量（1 535 mm）远大于多年平均年降雨量（386 mm），年降雨量主要依靠短期高强度暴雨，短期高强度暴雨容易引起表层土壤孔隙封堵和产生土壤结皮，导致土壤入渗速率下降等[7]。当降雨强度超过土壤入渗速率时，无法入渗降雨沿低湿低洼地流动，形成径流，径流溅蚀、剥离和搬运土壤颗粒。大量土壤颗粒流失引起上游土壤有机质和肥料等损失，造成下游土壤淤积、富营养化和酸化，加剧区域土壤质量退化和土地生产力下降，威胁区域和周边地区农牧业可持续发展[1,8]。在我国黄土高原丘陵沟壑区，径流是导致土壤侵蚀的主要因素，径流估算对有效利用降雨资源和控制水土流失具有重要意义。径流估算关键是建立方便有效径流预测模型，在土壤水分循环（蒸发、截留、径流、下渗等）机理研究的基础上，许多研究者提出不同地域性径流预测模型。尽管许多地域性径流模型用于该区域小流域径流预测和估算，但这些模型需要较多输入参数和复杂计算程序，不能有效反映流域尺度水文特性（土壤类型、坡度、土地利用等），使这些模型推广应用受到限制[9-10]。

SCS—CN 模型是美国农业部土壤保护局根据美国气候、地形特征及多年水文径流资料研发的 1 种径流估算经验模型，其结构简单、所需参数较少、模拟精确度较高和前提假设明确，广泛应用于水资源管理、暴雨模拟、径流估算等，该模型在美国、欧洲等国家推广应用取得较好效果[11]。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（AMC，antecedent moisture condition）、坡度、土壤类型、土地利用现状等综合特性的参数。有学者[12]研究指出，*CN* 取值变化可导致较大估算径流量变化；Hawkins[13]利用降雨实测径流资料和渐近线法推算径流曲线数 *CN* 值，取得较好的模拟精度。虽然 SCS—CN 模型用途广泛，但许多科学家质疑该模型参数（应用尺度、初损系数 λ 和 *CN* 等）的适用性和有效性。我国黄土高原丘陵沟壑区具有降雨年际和年内变化大、地形复杂、植被分布不均等特征，SCS—CN 模型的有效性和精确度受到限制[14-16]。在我国黄土高原丘陵沟壑区，SCS—CN 模型主要应用于小流域径流预测和估算，根据降雨、地形、植被等对模型参数进行修正，提高模型参数适用性和有效性。张钰娴等[17]对径流曲线数模型初损系数 λ 值敏感性进行分析，利用实测降雨资料定量分析初损系数 λ 值与地表坡度之间关系，得到黄土高原不同坡度适宜的初损系数 λ 值；Ponce 等[18]研究指出，初损系数 λ 不是定值，而是变值，根据降雨、地形、植被等修正初损系数 λ 值。

垄沟集雨覆盖种植技术是一种可持续高效利用降雨资源的农艺措施，该技术沿等高线起垄，形成沟垄相间微地形，拱形垄作为集雨区，平整沟作为种植区，集雨垄坡面与地面夹角为 34°～45°，垄高为 15～20 cm，垄宽为 20～120 cm，垄上径流和沟内降雨进行叠加，改变种植沟内土壤水分状况[7]。尹鑫卫等[19]将 SCS—CN 模型引入垄沟微型集雨系统，模拟 1 年集雨垄的实测径流量与估算径流量之间关系，得到不同覆盖材料和不同垄宽集雨垄的径流曲线数 *CN* 和初损系数 λ 值。

尽管关于 SCS—CN 模型参数率定、适用性和有效性的研究较多，将 SCS—CN 模型应用于垄沟集雨系统微型集雨垄径流预测和模拟的研究较少，尤其利用多年降雨和实测径流资料的研究更少。本文以修正 SCS—CN 模型为基础，采用连续 5 年（2012—2016 年）日降雨量和垄沟集雨系统微型集雨垄实测径流资料，分析日降雨量等级对修正 SCS—CN 模型参数的影响，在不同日降雨量等级情况下，率定不同覆盖材料和不同垄宽集雨垄的修正 SCS—CN 模型参数值（径流曲线数 *CN* 值、初损系数 λ 值和干旱湿润动态参数 α 值），检验修正 SCS—CN 模型参数值的适用性和有效性，为垄沟集雨系统微型集雨垄径流估算提供方法，为半干旱区水资源合理利用和控制水土流失提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

垄沟集雨系统微型集雨垄径流观测主要依托中国气象局干旱气象研究所定西干旱气象与生态环境实验站（35°33′N，104°35′E），海拔 1 896.7 m，该实验站位于甘肃省定西市西川农业科技园，试验基地距离定

西市西南 2～3 km。该区域属于典型温带大陆性季风气候，热量资源不足，气候干燥，年均气温 6.7 ℃，极端最低和最高气温分别为－6.9 ℃(1 月)和 19.2 ℃(7 月)，年均日照时间 2 438 h，多年平均蒸发量 1 535 mm，1971—2016 年平均年降雨量 386 mm，降雨年内和年际分布不均匀。根据美国土壤分类系统，试验地土壤类型以黄土状壤土为主，由风积性黄土演变而成，土壤抗侵蚀能力弱。在土层深度 0—2 m，土壤容重变化范围为 1.09～1.36 g/cm^3，田间持水量变化范围为 20%～21%，永久性枯萎系数为 5.16%。黄土层较厚，地下水位较深，土壤水与地下水联系微弱。耕作方式多为单作，由于缺乏热量资源，耕作制度为一年一熟制，主要种植农作物有玉米(*Zea mays* L.)、春小麦(*Triticum aestivum* L.)、蚕豆(*Vicia faba* L.)、燕麦(*Avena sativa* L.)和马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)等，主要种植饲草作物有紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)和红豆草(*Hedysarum onobrychis* L.)等。垄沟集雨系统微型集雨垄径流观测见图 1。

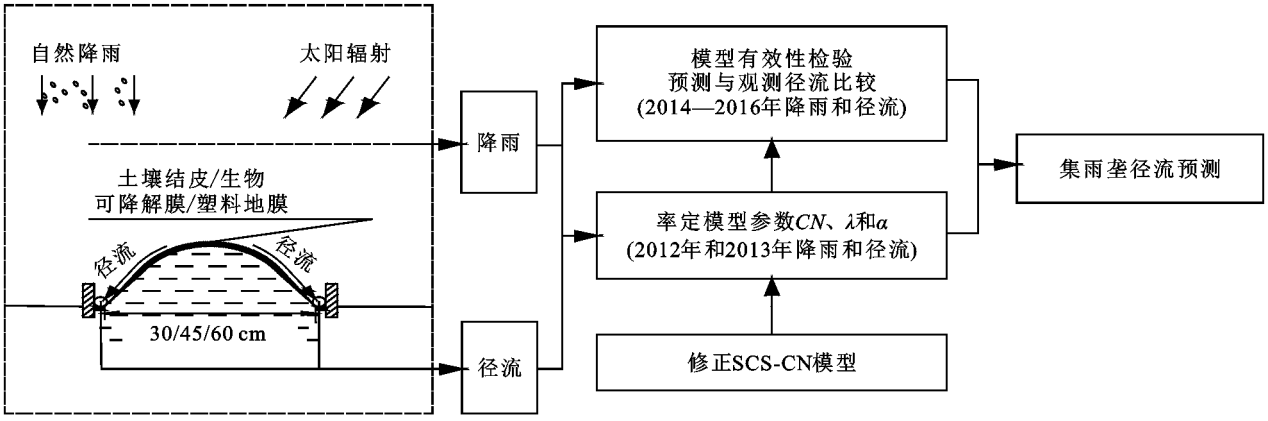


图 1 集雨垄径流预测

1.2 试验设计

试验采用裂区设计，覆盖材料为主区，垄宽为副区，3 种覆盖材料分别为土壤结皮、生物可降解地膜和塑料地膜，3 个垄宽分别为 30，45，60 cm，共设 9 个处理(3 种覆盖材料×3 个垄宽)，重复 3 次。土壤结皮为人工木板原土夯实，形成集雨垄，集雨垄坡度为 40°，高度为 25 cm，长度为 10 m，经过风吹、雨击、径流、干燥等作用形成土壤结皮，该集雨垄称为土垄；人工木板拍实原状土壤，集雨垄形状和大小与土垄相同，用生物可降解地膜和塑料地膜覆盖集雨垄，生物可降解地膜和塑料地膜埋于集雨垄坡脚土层深度 3—5 cm，分别形成生物可降解膜垄和塑料膜垄。石家庄市开发区永盛塑料制品有限公司提供塑料地膜，德国 BASF 公司提供生物可降解地膜，生物可降解地膜和塑料地膜厚度为 0.008 mm，宽度为 1.4 m。

1.3 试验管理

当土壤完全解冻后(2012 年 3 月 20 日)，平整土地，采用水准仪对每条集雨垄放线，集雨垄沿水平面坡度为 1/100，根据集雨垄设计要求，用铁锹堆积集雨垄，为确保集雨垄表面平整和平滑，人工木板拍实和拍光滑集雨垄，用喷雾器洒湿集雨垄表面土壤，使集雨垄表面土壤含水量为 14%～21%，覆盖生物可降解地膜和塑料地膜。为防止径流外溢，垄 4 周用水泥砖块修建围埂，围埂埋藏于土壤深度 15 cm，高出地面 8 cm，相邻围埂距离 1.5 m；为防止径流下渗，集雨垄坡脚 2 边沟槽内铺设防水布。在集雨垄低端处开挖径流收集槽，径流收集槽宽度和深度均为 1.5 m，径流收集槽内放置 100 L 带有 2 个小孔径流收集桶，用于收集径流，于 2012 年 4 月 1 日完成径流试验场修建。在连续 5 年(2012—2016 年)试验期，定期检查集雨垄完整性，如发现集雨垄损坏，及时修补集雨垄形状、尺寸和覆盖材料；同时，为了防止杂草截流对集雨垄径流的影响，定期手工清除集雨垄上杂草。每年径流观测结束之后，为防止径流收集桶塑料老化，将径流收集桶贮藏于库房。

1.4 径流采集与测定

降雨量数据由中国气象局兰州干旱气象研究所定西干旱气象与生态环境试验基地自动气象站测定，自动气象站距径流观测场 50～100 m，降雨量监测完整 1 天的时间为 8:00 am—8:00 pm。在连续 5 年(2012—2016 年)试验期间，有效降雨后，立即称重径流收集桶径流重量，径流称重后，用清水冲洗径流收集桶，确保径流收集精度。径流深等于径流量(体积)除以集雨垄投影面积。

1.5 SCS－CN 修正模型

1.5.1 标准 SCS－CN 模型 标准 SCS－CN 模型是基于水量平衡方程和 2 个基本假定的经验模型，在该模型中，降雨—径流关系方程表达为[20]：

$$Q=\begin{cases}\dfrac{[p-\lambda(\dfrac{25400}{CN}-254)^{\alpha}]^2}{p+(1-\lambda)(\dfrac{25400}{CN}-254)} & P\geqslant\lambda S\\ 0 & P<\lambda S\end{cases} \quad (1)$$

式中:λ 为初损系数,是区域无量纲参数,表示初损量与潜在最大损失量比值,取值范围为 $0\leqslant\lambda\leqslant0.4$;径流曲线数 CN 是 1 个反映降水前集水区特征的综合无量纲参数,取值范围为 0～100。

1.5.2　修正 SCS－CN 模型　前期研究结果[19]表明,对塑料地膜垄和生物可降解地膜垄而言,SCS－CN 模型模拟精度较高;对土垄而言,虽然 SCS－CN 模型模拟精度满足要求,但土垄模拟精度明显低于塑料地膜垄和生物可降解地膜垄。在标准 SCS－CN 模型中,CN 取值未考虑干旱与湿润之间的土壤湿度动态变化过程,仅考虑凋萎系数和田间持水量,导致预测径流产生不合理突变。前期土壤含水量对土垄径流产生效果明显,而对塑料地膜垄和生物可降解地膜垄径流产生效果不明显。修正 SCS－CN 模型引入 MoCN 模型中参数 α,考虑前期土壤含水量对径流的影响和干旱与湿润之间的土壤湿度动态变化过程[21]。

在 MoCN 模型中,重新定义了 I_a,公式为:

$$I_a=\lambda S\left(\frac{P}{P+S}\right)^{\alpha} \tag{2}$$

式中:λ 和 α 为系数。

结合公式(1)和(2),降雨—径流关系表达式为:

$$Q=\frac{\left[p-\lambda\left(\frac{25400}{CN}-254\right)\left(\frac{P}{P+\frac{25400}{CN}-254}\right)^{\alpha}\right]^2}{p+(1-\lambda)\left(\frac{25400}{CN}-254\right)\left(\frac{p}{p+\frac{25400}{CN}-254}\right)^{\alpha}}$$

$$P\geqslant\lambda S \text{ 或 } Q=0 \quad P<\lambda S \tag{3}$$

1.5.3　模型参数率定　为了建立约束条件的数学优化模型,本文利用标准差评估数组离散水平,标准差 σ 计算公式为:

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_i^{\text{cal}}-Q_i^{\text{obs}})^2}{n}} \tag{4}$$

式中:σ 越小,离散程度越小;σ 越大,离散程度越大。

结合公式(3)和(4),第 i 次预测径流量计算公式为:

$$Q_i^{\text{cal}}=\frac{\left[p_i-\lambda\left(\frac{25400}{CN}-254\right)\left(\frac{p_i}{p_i+\frac{25400}{CN}-254}\right)^{\alpha}\right]^2}{p_i+(1-\lambda)\left(\frac{25400}{CN}-254\right)\left(\frac{p_i}{p_i+\frac{25400}{CN}-254}\right)^{\alpha}} \tag{5}$$

结合公式(4)和(5),优化模型最终目标函数式为:

$$\sigma_{\min(CN,\alpha,\lambda)}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left\{\frac{\left[p_i-\lambda\left(\frac{25400}{CN}-254\right)\left(\frac{p_i}{p_i+\frac{25400}{CN}-254}\right)^{\alpha}\right]^2}{p_i+(1-\lambda)\left(\frac{25400}{CN}-254\right)\left(\frac{p_i}{p_i+\frac{25400}{CN}-254}\right)^{\alpha}}-Q_i^{\text{obs}}\right\}^2}{n}} \tag{6}$$

约束条件是 $0\leqslant\lambda\leqslant0.38$,$0<CN\leqslant100$,$0.09<\alpha\leqslant11.36$。式中:$Q_i^{\text{obs}}$ 为第 i 次预测径流量(mm);p_i 为第 i 次观测径流量(mm);n 为产生径流次数。

常规方法求解上述模型最优值存在较高难度,本研究利用径流实测数据和 Lingo 软件求解上述模型最优值。

1.5.4　模型有效性评价　为获得精确预测径流和反映集雨垄前期土壤含水量,本文引入 α 参数,同时,根据日降雨量级,日降雨量分为极高(>40 mm)、高(30～40 mm)、中(20～30 mm)、低(10～20 mm)和极低(<10 mm),对不同日降雨量等级下产生径流的修正 SCS－CN 模型参数进行率定。采用纳什效率 NSE (nash－sutcliffe efficiency)和平均相对误差 MRE (mean relative error)检验模型有效性。纳什效率 NSE 和平均相对误差 MRE 计算公式为[22-23]:

$$\text{NSE}=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(Q_i^{\text{obs}}-Q_i^{\text{cal}})^2}{\sum_{i=1}^{n}(Q_i^{\text{cal}}-Q_{\text{mean}}^{\text{obs}})^2} \tag{7}$$

$$\text{MRE}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{Q_i^{\text{cal}}-Q_i^{\text{obs}}}{Q_i^{\text{obs}}}\right|\times100\%}{n} \tag{8}$$

式中:Q_i^{obs} 为第 i 场降雨实测径流量(mm);Q_i^{cal} 为第 i 场降雨估算径流量(mm);$Q_{\text{mean}}^{\text{obs}}$ 为实测径流量平均值(mm);n 为径流观测次数。

相对误差 RE 反映预测径流量偏离实测径流量的数值,NSE 用于评价预测径流量与实测径流量之间的接近程度,NSE 取值范围为(－∞,1),NSE 越接近 1,表示接近程度越高。当 NSE 取值(0,1)时,表示模拟结果可信;当 NSE 取值(－∞,0)时,表示模拟结果不可信。

1.6　数据处理

采用 Excel 2016 对数据进行处理与统计分析,MATLAB 2018 软件计算预测径流,Lingo 12.0 软件对目标函数进行优化计算。

2　结果与分析

2.1　试验区降雨特征

降雨特征包括降雨量、降雨强度、雨型、降雨历时、雨滴动能和暴雨中心等,本研究只考虑日降雨量和日降雨量等级。对试验期 5 年(2012—2016 年)降

雨量数据统计分析(图2)可知,试验区降雨年内季节分配不均匀,全年降雨主要集中于4—10月,2012年、2013年、2014年、2015年和2016年4—10月降雨量占全年降雨量的比例分别为92.4%,94.6%,94.0%,88.0%和92.6%。就日降雨量而言,2012年、2013年、2014年、2015年和2016年日降雨量>40 mm降雨量占全年降雨量的比例分别为0,8.68%,9.00%,16.20%和0;日降雨量30~40 mm降雨量占全年降雨量的比例分别为14.1%,0,6.80%,11.50%和0;日降雨量20~30 mm降雨量占全年降雨量的比例分别为18.80%,32.50%,15.90%,7.30%和7.60%;日降雨量10~20 mm降雨量占全年降雨量的比例分别为26.30%,18.40%,35.00%,21.70%和28.20%;日降雨量<10 mm降雨量占全年降雨量的比例分别为40.80%,49.10%,42.30%,59.50%和64.20%。有效降雨定义为日降雨量>5 mm的降雨。通过对5年降雨有效性进行统计,无效降雨次数(345次)远大于有效降雨次数(118次),无效降雨对总降雨量的贡献率(74.6%)远小于有效降雨对总降雨量的贡献率(25.4%)。说明试验区的降雨主要以日小降雨量为主,全年降雨总量主要取决于次数较少的暴雨事件,次数较少的暴雨事件引起地表径流。试验期5年(2012—2016年)内总共发生463次降雨和118次径流,2012年、2013年、2014年、2015年和2016年发生降雨次数分别为98,92,103,97,73次,发生径流次数分别为27,30,26,19,16次,发生径流次数占总降雨量次数比例分别为27.6%,32.6%,25.2%,19.6%,21.9%。

2.2 修正SCS-CN模型参数率定

当标准SCS-CN模型应用我国黄土高原丘陵沟壑区径流预测时,由于降雨、地形、植被和土壤等发生变化,该模型模拟精确性受到质疑。为了提高模型模拟精确性,根据垄沟集雨系统微型集雨垄的形状、覆盖材料、宽度、垄坡、前期土壤含水量和干旱与湿润之间的土壤湿度动态变化过程等,引进参数α,将标准SCS-CN模型改进为修正SCS-CN模型。影响修正SCS-CN模型参数的因素包括降雨、地形、下垫面、土壤质地和土地利用方式等,该模型主要涉及的3个参数,分别为CN、λ和α。本文日降雨量等级分为极高、高、中、低和极低,根据日降雨量等级和相应径流,率定垄沟集雨系统微型集雨垄修正SCS-CN模型参数CN、λ和α。首先建立约束条件的数学优化模型,利用数学优化模型求解修正SCS-CN模型参数CN、λ和α。数学优化模型目标函数见公式(6)。当σ为最小时,观测值和预测值拟合效果最好。在求解3个参数的目标函数时,常规方法求解比较困难,本文利用Lingo软件编程,对3个参数的目标函数进行求解。基于修正的SCS-CN模型,利用2012年和2013年实测降雨量和观测径流资料,率定修正SCS-CN模型参数CN、λ和α。从表1可以看出,模型参数CN、λ和α随日降雨量等级变化不明显。就不同日降雨量等级的平均值而言,土壤结皮覆盖30 cm集雨垄的CN、λ和α分别为82.60,0.059,2.70,土壤结皮覆盖45 cm集雨垄的CN、λ和α分别为82.80,0.056,2.55,土壤结皮覆盖60 cm的集雨垄的CN、λ和α分别为82.5,0.058,2.65;生物可降解膜覆盖30 cm集雨垄的CN、λ和α分别为98.40,0.266,4.74,生物可降解膜覆盖45 cm集雨垄的CN、λ和α分别为98.60,0.282,4.65,生物可降解膜覆盖60 cm集雨垄的CN、λ和α分别为98.10,0.270,4.54;塑料地膜覆盖30 cm集雨垄的CN、λ和α分别为99.10,0.204,3.82,塑料地膜覆盖45 cm集雨垄的CN、λ和α分别为99.30,0.197,3.75,塑料地膜覆盖60 cm集雨垄的CN、λ和α分别为99.50,0.204,3.88。就同一覆盖材料不同集雨垄宽度平均值而言,土壤结皮覆盖集雨垄的CN、λ和α分别为82.60,0.058,2.63,生物可降解膜覆盖集雨垄CN、λ和α分别为98.30,0.273,4.64,塑料地膜覆盖集雨垄CN、λ和α分别为99.30,0.202,3.82。就不同覆盖材料相同集雨垄宽度平均值而言,垄宽30 cm集雨垄的CN、λ和α分别为93.40,0.176,3.75,垄宽45 cm集雨垄的CN、λ和α分别为93.60,0.178,3.65,垄宽60 cm集雨垄的CN、λ和α分别为93.40,0.177,3.69。

2.3 垄沟集雨系统微型集雨垄径流预测

在我国黄土高原丘陵沟壑区,通过2012年和2013年降雨量数据和观测径流资料率定修正SCS-CN模型参数CN、λ和α发现,参数CN、λ和α随日降雨量等级变化不明显。为了简化计算,求不同日降雨量级各处理修正SCS-CN模型参数CN、λ和α的平均值,利用参数CN、λ和α平均值、降雨量和公式(3)预测2014—2016年垄沟集雨系统微型集雨垄径流。将2014—2016年垄沟集雨系统微型集雨垄预测径流与实测径流比较,采用平均相对误差和纳什效率对修正SCS-CN模型有效性进行评价(图3、图4和图5)。在同一覆盖材料情况下,求不同集雨垄垄宽(30,45,60 cm)平均值,得到不同覆盖材料的平均相对误差和纳什效率。从图3可以看出,土壤结皮覆盖30 cm集雨垄的平均相对误差和纳什效率分别为2.43%和0.97,土壤结皮覆盖45 cm集雨垄的平均相对误差和纳什效率分别为1.36%和0.98,土壤结皮覆盖60 cm集雨垄的平均相对误差和纳什效率分别为3.41%和0.98,土壤结皮覆盖集雨垄的平均相对误差和纳什效率为2.62%和0.98;

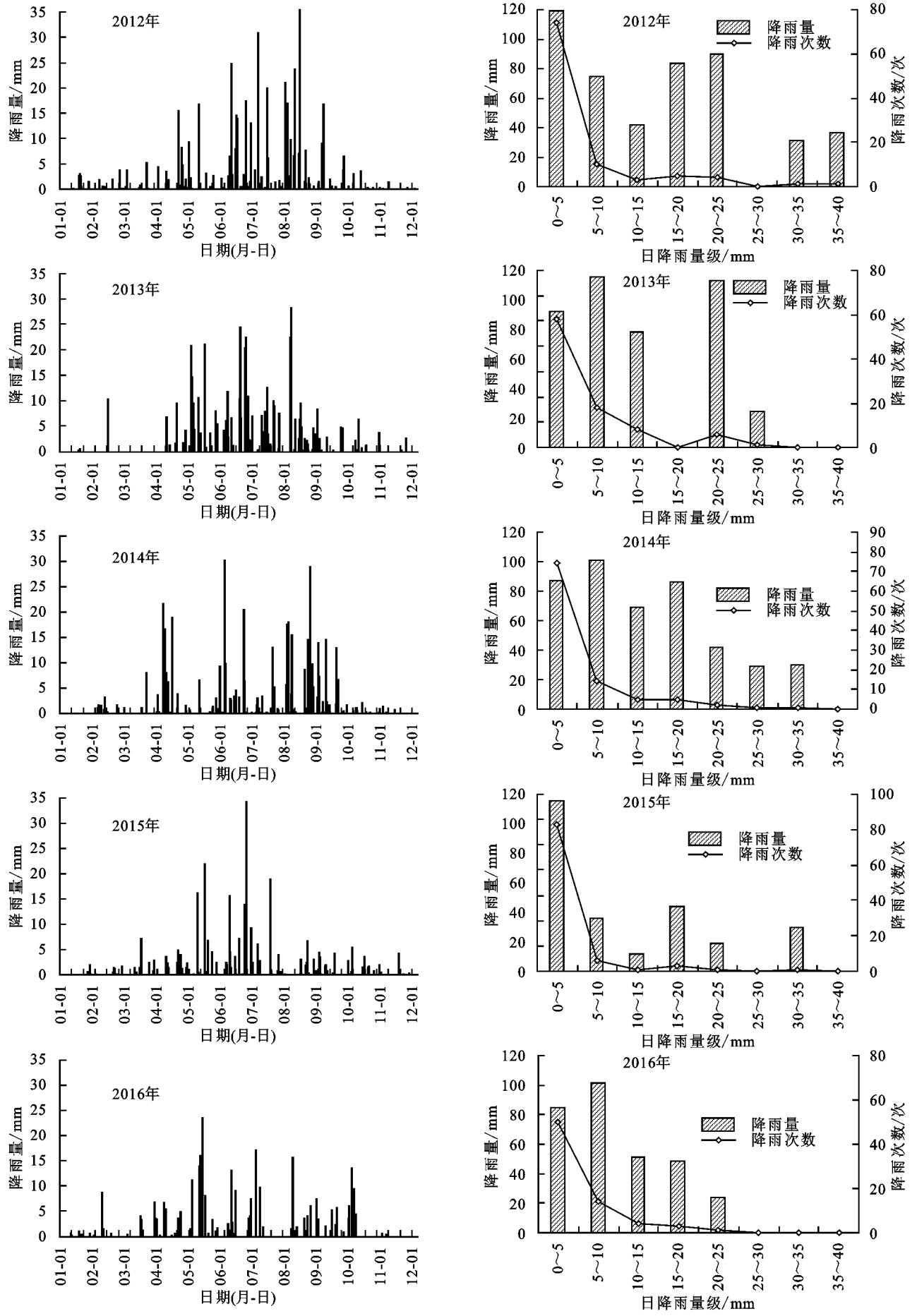


图 2　2012—2016 年日降雨量分布和级别

表 1 不同日降雨量等级修正 SCS－CN 模型参数

覆盖材料	垄宽/cm	0～10 mm			10～20 mm			20～30 mm			30～40 mm			40～50 mm		
		CN	λ	α	*CN*	λ	α	*CN*	λ	α	*CN*	λ	α	*CN*	λ	α
土壤结皮	30	82.9	0.069	2.89	82.6	0.067	2.67	82.6	0.054	2.65	82.8	0.045	2.78	82.0	0.061	2.49
	45	82.3	0.071	2.67	82.8	0.056	2.65	82.8	0.049	2.35	83.8	0.053	2.67	82.5	0.051	2.43
	60	82.8	0.061	2.43	82.5	0.062	2.78	82.4	0.053	2.78	82.5	0.064	2.65	82.4	0.052	2.63
生物可降解膜	30	97.9	0.269	4.67	98.3	0.256	4.82	98.8	0.274	4.82	98.3	0.278	4.61	98.6	0.251	4.78
	45	98.7	0.271	4.56	98.4	0.278	4.62	98.7	0.269	4.62	98.8	0.327	4.72	98.3	0.267	4.72
	60	98.2	0.251	4.21	97.9	0.283	4.82	98.2	0.276	4.41	98.0	0.265	4.37	98.0	0.276	4.87
普通塑料地膜	30	99.5	0.211	3.45	98.9	0.199	3.98	98.3	0.198	3.83	99.5	0.210	3.91	99.5	0.202	3.92
	45	99.0	0.193	3.32	99.4	0.201	3.87	99.3	0.189	3.89	99.4	0.203	3.81	99.4	0.199	3.87
	60	99.4	0.201	3.67	99.9	0.213	3.99	99.7	0.204	3.91	99.2	0.201	3.87	99.5	0.200	3.97
处理平均值	土壤结皮	82.7	0.067	2.66	82.6	0.062	2.70	82.6	0.052	2.59	83.0	0.054	2.70	82.3	0.055	2.52
	生物可降解膜	98.3	0.264	4.48	98.2	0.272	4.75	98.6	0.273	4.62	98.4	0.290	4.57	98.3	0.265	4.79
	普通塑料地膜	99.3	0.202	3.48	99.4	0.204	3.95	99.1	0.197	3.88	99.4	0.205	3.86	99.5	0.200	3.92
	30	93.4	0.183	3.67	93.3	0.174	3.82	93.2	0.175	3.77	93.5	0.178	3.77	93.4	0.171	3.73
	45	93.3	0.178	3.52	93.5	0.178	3.71	93.6	0.169	3.62	94.0	0.194	3.73	93.4	0.172	3.67
	60	93.5	0.171	3.44	93.4	0.186	3.86	93.4	0.178	3.70	93.2	0.177	3.63	93.3	0.176	3.82

注：*CN* 为径流曲线数；λ 为初损系数；α 为动态指数。

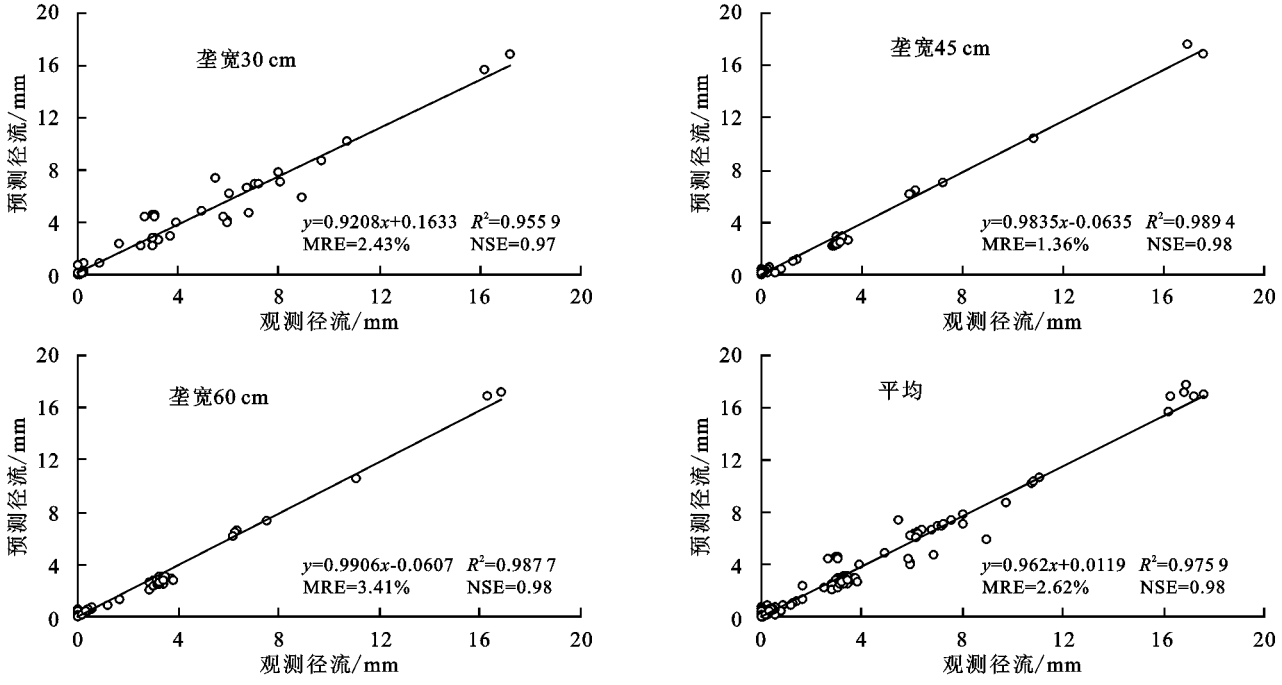


图 3 2014－2016 年土壤结皮覆盖集雨垄预测径流与观测径流比较

从图 4 可以看出，生物可降解膜覆盖 30 cm 集雨垄的平均相对误差和纳什效率分别为 2.34％和 0.98，生物可降解膜覆盖 45 cm 集雨垄的平均相对误差和纳什效率分别为 3.42％和 0.98，生物可降解膜覆盖 60 cm 集雨垄的平均相对误差和纳什效率分别为 1.21％和 0.98，生物可降解膜覆盖集雨垄的平均相对误差和纳什效率分别为 1.38％和 0.98；从图 5 可以看出，塑料地膜覆盖 30 cm 集雨垄的平均相对误差和纳什效率分别为 3.46％和 0.97，塑料地膜覆盖 45 cm 集雨垄的平均相对误差和纳什效率分别为 5.42％和 0.98，塑料地膜覆盖 60 cm 集雨垄的平均相对误差和纳什效率分别为 2.48％和 0.96，塑料地膜覆盖集雨垄的平均相对误差和纳什效率分别为 3.36％和 0.97。

3 讨 论

美国农业部研发的 SCS－CN 模型广泛应用于水环境、水文、水资源等领域模拟[20]，该模型是基于水量平衡的径流预测模型，由于输入参数少、计算过程简单、资料易于获取等优点，被广泛应用于以农业土地利用为主小流域的径流预测。本研究利用修正 SCS－CN 模型，考虑日降雨量等级对垄沟集雨系统微型集雨垄径流的影响。修正 SCS－CN 模型是 1 个输入降雨量和输出径流量的径流估算模型，该模型不考虑径流累积、径流历时、坡度和降雨入渗等情况[24]。

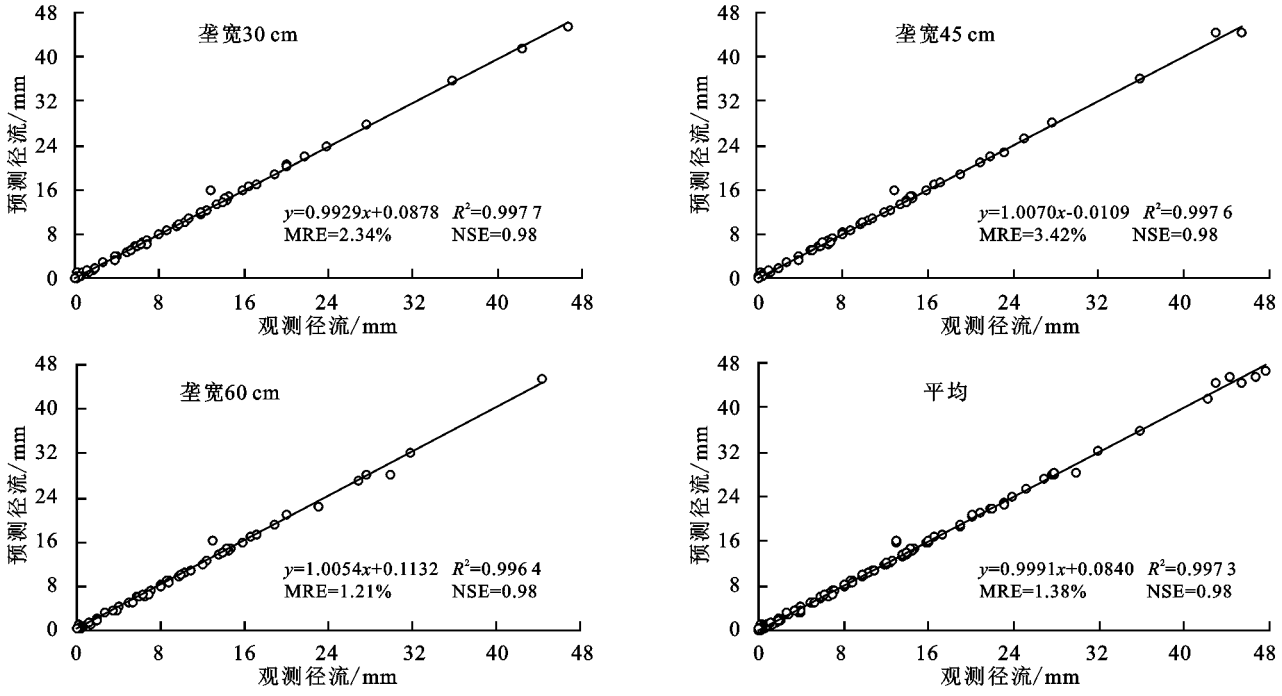


图 4　2014—2016 年生物可降解膜覆盖集雨垄预测径流与观测径流比较

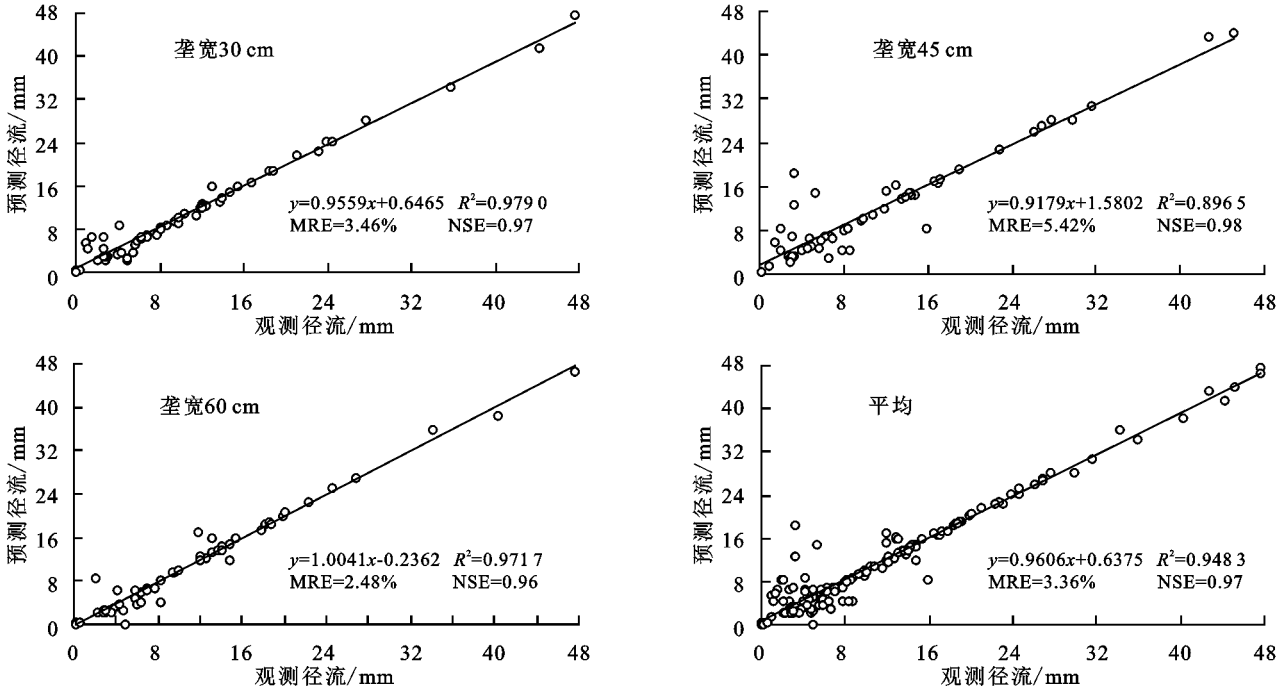


图 5　2014—2016 年塑料地膜覆盖集雨垄预测径流与观测径流比较

该模型主要包括 3 个参数,参数 CN、λ 和 α 值对修正 SCS—CN 模型径流估算起关键作用,前期土壤含水量、土壤覆盖材料、垄宽等因素影响参数 CN、λ 和 α 取值。CN 值反映径流产生潜力,如土壤条件、土地利用方式、植被覆盖等,较低 CN 值表示表层土壤具有较高持水潜力,更多降雨将贮藏于土壤表面;初损系数 λ 表示初损量与潜在最大损失量比值,反映植物截留、填洼、下渗等情况[25];α 值表示土壤湿润程度,反映前期土壤含水量和干旱与湿润之间的土壤湿度动态变化过程[21]。有研究[4,26]结果表明,我国黄土高原丘陵沟壑区属于半干旱温带大陆性气候,降雨以短历时暴雨为主,地表径流以超渗产流为主,气候、地形、土壤和植被等与美国农业部土壤保持局提供的资料存在差异,根据 CN 表中查得 CN 值和初损系数 λ 默认值(0.2),SCS—CN 模型模拟精度不能满足实际需求。刘贤赵等[27]研究结果表明,当初损系数 λ 从 0.351 调整为 0.812 时,黄土高原丘陵沟壑区径流预测模型纳什效率从 0.768 提高到 0.876;陈正维等[20]选取 5 场降雨和观测径流数据,采用修正 SCS—CN 模型,分析径流与地表坡度之间关系,对初损系数 λ 进行调整,结果表明,当 $\lambda=0.3$ 时,修正模型模拟效果较为理想,坡度 6.5°,10°,15°,20°和 25°对

应 *CN* 值分别为 78.23,78.45,78.77,79.11,79.47。何杨洋等[11]发现,当径流量<10 mm 时,裸地条件预测径流量与实测径流量较为接近;当径流量<5 mm 时,耕地条件预测径流量与实测径流量较为接近;当径流量<2 mm 时,草地条件预测径流量与实测径流量较为接近;郭宇等[28]研究结果表明,日降雨强度与径流量呈显著性相关($P<0.01$),在黄土丘陵沟壑区日降雨强度是影响各植被径流产生的主要因素;Ziadat 等[29]研究结果表明,在黄土丘陵沟壑区日降雨量和最大 30 min 降雨强度是影响径流最重要的 2 个特征参数。气温、湿度、气压、风速、风向等决定降雨因素,降雨因素包括降雨量、降雨强度、降雨历时、降雨面积等,降雨量不是影响径流的唯一降雨因素,在不同研究区域和土地利用类型下,径流量与降雨量的相关程度不同。本研究结果表明,修正 SCS-CN 模型 *CN*、λ 和 α 随日降雨量等级变化不明显。土壤结皮覆盖集雨垄的 *CN*、λ 和 α 取值范围分别是 82.0~82.9,0.045~0.071,2.35~2.89,生物可降解膜覆盖集雨垄的 *CN*、λ 和 α 取值范围分别是 97.9~98.8,0.251~0.327,4.21~4.82,塑料地膜覆盖集雨垄的 *CN*、λ 和 α 取值范围分别是 98.3~99.9,0.189~0.213,3.32~3.99。Sahu 等[30]通过降雨量等级预测地表径流表明,降雨量在 10~20 mm 时,SCS-CN 模型模拟精确度较高,当降雨量<10 mm 时,SCS-CN 模型模拟精确度较低。Surendra 等[16]研究认为,SCS-CN 模型参数 *CN* 值随降雨历时增加而逐渐减小,降雨量、降雨历时、最大 30 min 降雨强度是影响径流的主要因子,将降雨量、降雨历时、最大 30 min 降雨强度引入 SCS 模型,优化模型参数,可以提高模型预测精度。

单目标拟合优化是以某一目标函数为约束条件,在该约束条件下,使目标函数达到收敛。Huang 等[31]在我国黄土高原丘陵沟壑区利用坡度优化 *CN* 值,纳什效率从 0.70 提高到 0.83。本研究结果表明,修正 SCS-CN 模型 *CN*、λ 和 α 随日降雨量等级变化不明显,采用算数平均法计算不同日降雨量等级修正 SCS-CN 模型 *CN*、λ 和 α 平均值,利用平均 *CN*、λ 和 α 值估算垄沟集雨系统微型集雨垄径流,通过用平均相对误差和纳什效率检验模型有效性。土壤结皮覆盖集雨垄的平均相对误差和纳什效率取值范围分别为 1.36%~3.41%和 0.97~0.98,生物可降解膜覆盖集雨垄的平均相对误差和纳什效率取值范围分别为 1.21%~3.42%和 0.97~0.98,塑料地膜覆盖集雨垄的平均相对误差和纳什效率取值范围分别为 2.48%~5.42%和 0.96~0.98。本研究预测径流模型纳什效率取值范围为 0.96~0.98,相对误差取值范围是 1.21%~5.42%,以相对误差 20%为许可误差,表示模拟结果可信。

4 结 论

在我国黄土高原丘陵沟壑区,用修正 SCS-CN 模型预测集雨垄径流表明,日降雨量等级对修正 SCS-CN 模型 *CN*、λ 和 α 的影响不明显,不同覆盖材料之间的 *CN*、λ 和 α 差异远大于不同垄宽的 *CN*、λ 和 α 差异,修正 SCS-CN 模型径流预测的相对误差满足要求(≤20%),可信度较高(纳什效率≥0.95),修正 SCS-CN 模型模拟结果可信,该研究结果对我国黄土高原丘陵沟壑区推广垄沟集雨种植和控制水土流失提供参考。

参考文献:

[1] Jia Y, Li F M, Wang X L. Soil quality responses to alfalfa watered with a field micro-catchment technique in the Loess Plateau of China[J]. Field Crops Research, 2006,95(1):64-74.

[2] Bo X, Hai W Q, Jun F, 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.

[3] Mao X Y, Meng J J, Xiang Y Y. Cellular automata-based model for developing land use ecological security patterns in semi-arid areas: A case study of Ordos, Inner Mongolia, China[J].Environmental Earth,2013,70(1):269-279.

[4] Wei L H, Zhang B, Wang M Z. Effects of antecedent soil moisture on runoff and soil erosion in alley cropping systems[J]. Agricultural Water Management, 2007, 94(1/3):54-62.

[5] Hamdan J, Burnham C P, Ruhana B. Degradation effect of slope terracing on soil quality for oil palm. cultivation[J]. Land Degradation & Development, 2015, 11(2): 181-193.

[6] 李富春,王琦,张登奎,等.坡地打结垄沟集雨对水土流失、紫花苜蓿干草产量和水分利用效率的影响[J].水土保持学报,2018,32(1):147-156.

[7] 胡广荣,王琦,宋兴阳,等.沟覆盖材料对垄沟集雨种植土壤温度、作物产量和水分利用效率的影响[J].中国生态农业学报,2016,24(5):590-599.

[8] Zheng F L. Effect of vegetation changes on soil erosion on the Loess Plateau[J].Pedosphere,2006,16(4):420-427.

[9] Han E, Merwade V, Heathman G C. Implementation of surface soil moisture data assimilation with watershed scale distributed hydrological model[J]. Journal of Hydrology,2012,416(1):98-117.

[10] Soulis K X, Valiantzas J D. Identification of the SCS-

CN parameter spatial distribution using rainfall-runoff data in Heterogeneous Watersheds[J].Water Resources Management,2013,27(6):1737-1749.

[11] 何杨洋,王晓燕,段淑怀.密云水库上游流域径流曲线模型的参数修订[J].水土保持学报,2016,30(6):134-138.

[12] Rawat K S, Singh S K. Estimation of surface runoff from semi-arid ungauged agricultural watershed using SCS-CN method and earth observation data sets[J]. Water Conservation Science & Engineering, 2017, 1(4):233-247.

[13] Hawkins R H. Asymptotic determination of runoff curve numbers from data[J].Journal of the Irrigation and Drainage Division, American Society of Civil Engineers,1993,119(2):334-345.

[14] Mishra S K, Pandey R P, Jain M K, et al. A rain duration and modified AMC-dependent SCS-CN procedure for long duration rainfall-runoff events[J].Water Resources Management,2008,22(7):861-876.

[15] Chen F J. Water erosion response to rainfall and land use in different drought-level years in a loess hilly area of China[J].Catena,2010,81:24-31.

[16] Surendra K M, Vijay P S. Validity and extension of the SCS-CN method for computing infiltration and rainfall-excess rates[J].Hydrological Processes,2010,18(17):3323-3345.

[17] 张钰娴,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.

[18] Ponce V M, Hawkins R H. Runoff curve number: Has it reached maturity? [J]Journal of Hydrologic Engineering,1996,1(1):11-19.

[19] 尹鑫卫,李晓玲,康燕霞,等.基于 SCS－CN 模型的沟垄微型集雨系统径流预测[J].生态学杂志,2015,34(12):3502-3508.

[20] 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.

[21] Wang X, Shang S, Yang W, et al. Simulation of an agricultural watershed using an improved curve number method in SWAT[J]. Transactions of the ASABE, 2008,51(4):1323-1339.

[22] Verma S, Mishra S K, Singh A, et al. An enhanced SMA based SCS－CN inspired model for watershed runoff prediction[J/OL]. Environmental Earth Sciences,2017,76(21).DOI: 10.1007/s12665-017-7062-2.

[23] Lin F, Chen X W, Yao H X. Evaluating the use of Nash-Sutcliffe efficiency coefficient in goodness-of-fit measures for daily runoff simulation with SWAT [J].Journal of Hydrologic Engineering,2017,22(11):231-239.

[24] Duraisamy K, Balasubramanian A, Subramani T, et al. Rainfall-surface runoff estimation for the Lower Bhavani basin in south India using SCS－CN model and geospatial techniques[J].Environmental Earth Science, 2020,79(13):335-354.

[25] Soulis K X, Valiantzas J D. SCS－CN parameter determination using rainfall-runoff data in heterogeneous watersheds: The two－CN system approach[J].Hydrology and Earth System Sciences,2012,16(3):1001-1015.

[26] 许秀泉,范昊明,李刚.径流曲线法在东北半干旱区几种土地利用方式径流估算中的应用与改正[J].水土保持学报,2019,33(4):52-57.

[27] 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.

[28] 郭宇,张娜,程冀文,等.降雨因子对黄土丘陵沟壑区不同植被毯措施径流小区产流产沙量的影响[J].内蒙古林业科技,2019,45(2):30-34.

[29] Ziadat F M, Taimeh A Y. Effect of rainfall intensity, slope, land use and antecedent soil moisture on soil erosion in an arid environment[J].Land Degradation & Development,2013,24(6):582-590.

[30] Sahu R K, Mishra S K, Eldho T I. Comparative evaluation of SCS－CN－inspired models in applications to classified datasets[J].Agricultural Water Management, 2010,97(5):749-756.

[31] 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.