

# 沟道土地整治对不同植被覆盖流域 CN 值的影响

李星瑶<sup>1</sup>, 张根广<sup>1</sup>, 高建恩<sup>1,2,3</sup>, 高哲<sup>1</sup>, 麻卉港<sup>1</sup>, 封博研<sup>1</sup>, 马林<sup>1</sup>

(1.西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的] 探究黄土丘陵沟壑区沟道土地整治后流域径流曲线数的变化规律, 寻求合适的产流参数, 为该区沟道土地整治工程安全和巩固生态建设成果提供科学支撑。[方法] 基于流域实体比尺模型分析不同植被覆盖条件下沟道土地整治对流域径流曲线数的影响。[结果] 同一植被覆盖度下, 流域径流曲线数随着整治比例的增大而减小; 与未整治流域相比, 整治比例为 20% 时的流域径流曲线数减小了 6.77; 就分段整治比例而言, 流域径流曲线数的减小速率随着整治比例的增大呈先增大后减小的趋势, 整治比例由 0.5% 增大至 5% 时减小速率最大; 不同植被覆盖度下, 流域径流曲线数均随着整治比例的增大而减小, 植被覆盖度为 50% 时沟道土地整治后流域径流曲线数的减小速率最大; 植被覆盖度对沟道土地整治区域的径流曲线数影响显著, 同一整治比例下, 植被覆盖度每增大 1%, 沟道土地整治区域的径流曲线数减小 0.22。[结论] 沟道土地整治可以改变流域下垫面, 对径流曲线数影响显著。

**关键词:** 黄土丘陵沟壑区; 沟道土地整治工程; SCS-CN; 径流曲线数; 实体比尺模型

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-288X(2021)04-0054-07

**中图分类号:** P334.92

**文献参数:** 李星瑶, 张根广, 高建恩, 等. 沟道土地整治对不同植被覆盖流域 CN 值的影响[J]. 水土保持通报, 2021, 41(4): 54-60. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.04.008; Li Xingyao, Zhang Genguang, Gao Jianen, et al. Effects of gully land consolidation project on CN in catchments with different vegetation coverage [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(4): 54-60.

## Effects of Gully Land Consolidation Project on CN in Catchments with Different Vegetation Coverage

Li Xingyao<sup>1</sup>, Zhang Genguang<sup>1</sup>, Gao Jianen<sup>1,2,3</sup>, Gao Zhe<sup>1</sup>, Ma Huigang<sup>1</sup>, Feng Boyan<sup>1</sup>, Ma Lin<sup>1</sup>

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling,

Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] The variation of runoff curve number after the gully land consolidation project (GLCP) was studied to explore the appropriate flow generation parameters, and to provide scientific support for the safety of GLCP and the consolidation of achievements in ecological construction. [Methods] Based on the physical scale model, the influence of GLCP on the runoff curve number under different vegetation cover conditions was investigated. [Results] Under the same vegetation coverage, the runoff curve number decreased with the increase of the land consolidation proportion. Compared with the unconsolidated basin, the runoff curve number decreased by 6.77 when the consolidation proportion was 20%. The decreasing rate of runoff curve number increased firstly and then decreased with the increase of land consolidation proportion, and the decrease rate reached the maximum when the consolidation proportion increased from 0.5% to 5%. Under different vegetation coverage, the runoff curve number decreased with the increase of consolidation proportion, and the decreasing rate of runoff curve number reached the maximum at the vegetation coverage of 50%. Vegetation coverage had great effects on the runoff curve number of the gully land consolidation

收稿日期: 2021-03-19

修回日期: 2021-05-22

资助项目: 国家重点研发计划项目“黄土丘陵沟壑区边坡工程—沟道整治生态安全调控技术”(2017YFC0504703)

第一作者: 李星瑶(1997—), 女(汉族), 山西省忻州市人, 硕士研究生, 研究方向为水力学及水土资源高效利用。Email: xyao97@163.com。

通讯作者: 张根广(1964—), 男(汉族), 山西省运城市人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事水力学及河流动力学研究。Email: zgg64@163.com。

area, and the runoff curve number decreased by 0.22 in the gully land consolidation area when the vegetation coverage increased by 1%. [Conclusion] The GLCP could change the hydrological characteristics of basin under layer and has significant effects on the runoff curve number.

**Keywords:** loess hilly and gully region; gully land consolidation project; SCS-CN; curve number; physical scale model

黄土高原是世界上水土流失最严重的地区,“退耕还林(草)”工程有效改善了区域生态环境,但由此也产生了耕地面积不足的问题<sup>[1-2]</sup>。其后实施的沟道土地整治工程在缓解人地矛盾和确保粮食安全方面发挥了重要作用<sup>[3-4]</sup>。沟道土地整治工程系指在流域废弃或者多年淤不满的淤地坝或者新建挡土墙前,通过切削沟道边坡,人工填充沟道而形成高质量土地的工程。沟道土地整治区域即人工回填沟道后新增的土地。该工程是黄土高原在“退耕还林(草)”工程后进一步实施的新型沟道治理措施。由于沟道土地整治需要切削高陡边坡,填埋沟道造地,因此改变了下垫面条件,也必然对产汇流产生影响,然而进行沟道土地整治首先需要产汇流计算。因此研究沟道土地整治条件下的产汇流变化问题,对确保沟道土地整治工程安全,巩固“退耕还林(草)”成果,进一步确保黄土高原地区粮食安全、土地安全、生态安全及高质量发展都具有重要意义。

产汇流计算是流域水文学的重要研究内容。高建恩、姜现勇和孙彭成等<sup>[5-6]</sup>的室内水槽人工降雨试验结果表明,沟道土地整治后沟道蓄水能力增强,沟道土地整治对沟道降水分配、产汇流等都有较大影响。SCS-CN 是 20 世纪 50 年代由美国农业部土壤保持局提出的,常用于推求小流域设计洪水过程,已被 SWAT, SWMM 以及 HEC-HMS 等数学模型采用。径流曲线数是 SCS 模型中的主要参数,表征了流域下垫面的产流能力,它与流域坡度、土壤湿润度(AMC)、植被类型及覆盖度、土壤类型和土地利用状况等关系密切,对计算结果的精确性有显著影响<sup>[7]</sup>。模型自身虽构建了径流曲线数检索表,但由于该值会随时空变化,不同地区在气候、地形、土壤类型、土地利用等方面差异较大,因此在应用时应根据研究区情况对参数进行一定修正<sup>[8-10]</sup>。目前 SCS 模型在黄土高原的应用研究已有不少。Liu 等<sup>[11]</sup>基于遥感数据和水文气象资料,采用 SCS 模型模拟了黄土高原典型小流域单次暴雨地表径流的变化过程,并给出了适合流域的径流曲线数取值范围。Huang 等<sup>[12]</sup>将坡度因子嵌入 SCS 产汇流算法中,提出适用于中国黄土高原地区径流曲线数随着坡度变化的关系式。罗利芳等<sup>[13]</sup>也对径流曲线数随坡度变化的特性进行了探

索。王英等<sup>[10,14]</sup>利用径流小区试验资料对黄土区谷子、苜蓿以及高粱用地的径流曲线数进行优化,并将雨强引入模型以提高计算精度。邓景成等<sup>[15]</sup>通过模拟降雨将黄土区草地和裸地的初损率和径流曲线数进行了率定。SCS 模型已成为黄土高原地区产汇流计算的重要方法,沟道土地整治工程规模宏大,影响深远,但目前还未对 SCS 模型在沟道土地整治流域的应用进行探索。为此,本文针对黄土丘陵沟壑区大规模沟道土地整治后流域径流曲线数变化研究较为薄弱的问题,基于流域实体比尺模型,模拟分析不同比例的沟道土地整治工程对不同植被覆盖流域径流曲线数的影响,旨在寻求沟道土地整治区域径流曲线数的变化规律。

## 1 材料与方 法

### 1.1 SCS-CN 模型

SCS-CN 模型是基于水分平衡方程如公式(1),和两个基本假设如公式(2)–(3)建立的,由以上 3 式可得产流计算公式如公式(4)。流域最大可能滞留量  $S$  与  $CN$  的经验关系如公式(5),由以上各式可得  $CN$  值的反算公式如公式(6)。

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

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

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

$$\begin{cases} Q = 0 & (P \leq \lambda S) \\ Q = \frac{(P - \lambda S)^2}{P + S - \lambda S} & (P > \lambda S) \end{cases} \quad (4)$$

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

$$CN = \frac{25\ 400}{254 + 5[P + 2Q - (4Q^2 + 5PQ)^{1/2}]} \quad (6)$$

式中: $P$  为降雨总量(mm);  $I_a$  为初损量(mm);  $F$  为入渗量(mm);  $Q$  为径流量(mm);  $\lambda$  是一个区域系数,表示初损量与最大可能蓄水量之间的比值,一般取值 0.2;  $S$  为流域当时的最大可能滞留量(mm),是后损量的上限;  $CN$  是反映水文土壤类型、流域前期湿润等级以及土地利用类型等因素的综合指标,取值在 0~100。水文土壤类型根据土壤质地和最小入

渗率进行分类,随着渗透性的依次降低被划分为 A、B、C、D 这 4 类<sup>[10]</sup>。根据前 5 d 的总降雨量确定流域前期湿润等级,分为 AMC I (干旱)、AMC II (一般)和 AMC III (湿润)3 种等级,AMC I 等级下的  $CN_I$  和 AMC III 等级下的  $CN_{III}$  可由 AMC II 等级下  $CN_{II}$  换算得到<sup>[10]</sup>。CN 可根据水文土壤类型、流域前期湿润等级以及土地利用类型查表获得。

## 1.2 比尺模型试验

1.2.1 试验设备 为了研究不同整治比例  $k$  (新增耕地面积与其拦挡工程以上流域面积的比值)对不同植被覆盖流域径流曲线数的影响,本研究选用试验设备

为黄土高原延安燕沟康家圪崂沟小流域比尺模型<sup>[16]</sup> (图 1)。该模型原型流域面积  $0.34 \text{ km}^2$ ,流域长度  $0.903 \text{ km}$ ,平均宽度  $0.52 \text{ km}$ ,形状系数  $0.52$ ,土壤以黄绵土为主,土壤颗粒中以粉粒和砂粒为主,水文土壤类型为 B 类,抗冲性和抗蚀性较差。模型几何比尺为  $1:100$ ,其降雨、径流、侵蚀、输移相似比尺参考文献<sup>[16]</sup>。人工降雨器材采用 BX-1 型便携式野外降雨器,试验前进行雨强率定,确保降雨均匀度达到 75% 以上,在满足几何、植被、降雨、径流、侵蚀、输移等模型验证条件基础上进行不同整治比例和植被覆盖度条件的径流曲线数试验。

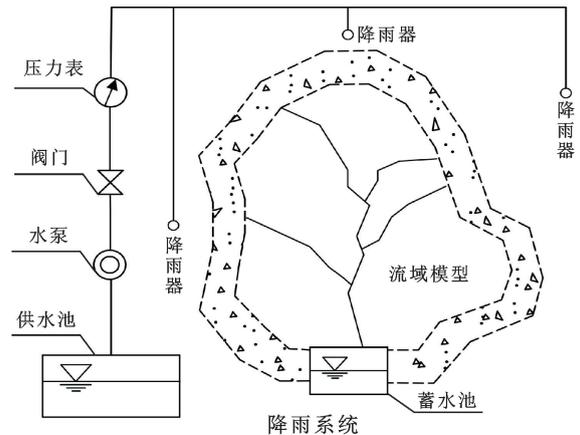


图 1 流域实体模型及试验概况

1.2.2 准备工作 试验前准备工作包括土样选择、模型高程校核、人工降雨雨强率定以及模型产流产沙验证等。根据延安地区历年降雨资料以及康家圪崂小流域产流产沙数据,同时参考前人研究成果,康家圪崂流域年平均侵蚀性降雨量为  $141 \text{ mm}$ <sup>[16]</sup>。本试验选取适用于模型的当量雨强为  $0.114 \text{ mm/min}$ ,降雨历时为  $40 \text{ min}$ 。将 2020 年 7 月地形恢复后裸坡条件下与 2003 年原型条件下模型的产流产沙情况进行对比,各项参数对比详见表 1。各项误差均在 20% 之内<sup>[17]</sup>,可知地形修复后验证试验的水沙过程与原型

是基本相似的,可在此基础上开展后续试验。

1.2.3 试验设计 试验设计的沟道土地整治比例  $k$  分别为  $0\%$ 、 $0.5\%$ 、 $5\%$ 、 $10\%$ 、 $15\%$  和  $20\%$ ,沟道土地整治工程分布于流域沟道,其余面积的土地利用类型为草地。 $k$  为  $0\%$  时,流域不布设挡墙, $k$  为  $0.5\%$ 、 $5\%$  以及  $15\%$  时分别加设挡墙,挡墙高度为  $5 \text{ cm}$ ,顶宽  $2 \text{ cm}$ ,迎背水坡比为  $1:1.5$ 。设置植被覆盖度为  $0\%$ 、 $25\%$ 、 $50\%$ 、 $75\%$  和  $90\%$ ,植被高度为  $8 \text{ cm}$ 。本试验中,用秒表测定产流及径流停止时间;主沟道自上游而下等距  $1 \text{ m}$  处及各挡墙前设置观测点,

每个观测点按横向左、中、右 3 个测点来测量径流深及水面线长度,每隔 5 min 测量一次;由径流停止后

挡墙前的水深及沟道坡度可计算出每次降雨的总产流量。

表 1 2020 年与 2003 年验证试验对比

项目	雨强/ (mm · min <sup>-1</sup> )	侵蚀性降雨量/mm	汇流时间/h	平均汇流速度/ (m · s <sup>-1</sup> )	最大汇流量/ (m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	侵蚀模数/ (t · km <sup>-2</sup> · a <sup>-1</sup> )
2003 年	0.114	5.10	0.30	0.84	5~6.39	2 900
2020 年	0.116	5.21	0.35	0.96	4.92	2 355

### 1.3 岔巴沟流域“7·26”降雨径流曲线数验证

为验证物理模型试验所得径流曲线数在黄土丘陵沟壑区流域的适用性,本文将模拟试验所得径流曲线数结果应用于 SWMM 模型中,构建典型沟道土地整治流域岔巴沟的数学模型,并对 2017 年 7 月 26 日降雨进行产汇流计算验证。SWMM(storm water management model)是一个动态的降雨—径流模拟模型,其参数要求较少、操作便捷、模拟精度较高,主要用于单次降雨或长期的水量和水质模拟<sup>[18]</sup>,选用 SCS 模型作为其地表产流计算方法。选用纳什系数(NSC)和相对误差(RE)对计算结果进行评价。其中,NSC 的范围在 0~1 之间,数值越接近 1,模型的吻合度越高,RE 越小模拟结果越精确。NSC 大于 0.5 时计算结果是令人满意的,RE 小于 20%为许可误差。数学表达式为:

$$NSC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_i)^2} \quad (7)$$

$$RE = \left( \frac{P_i}{O_i} - 1 \right) \times 100\% \quad (8)$$

式中: $P_i$  为模拟计算值(m<sup>3</sup>/s);  $O_i$  为实测值(m<sup>3</sup>/s);  $\bar{P}_i$  为模拟平均值(m<sup>3</sup>/s);  $\bar{O}_i$  为实测平均值(m<sup>3</sup>/s);  $n$  为样本总数。

## 2 结果与分析

### 2.1 流域径流曲线数的变化分析

2.1.1 同一植被覆盖下流域径流曲线数随整治比例的变化 为了研究流域同一植被覆盖条件下的径流曲线数随整治比例的变化规律,将不同植被覆盖度下的径流曲线数进行算数平均,点绘其与整治比例的关系如图 2 所示。图 2 表明流域径流曲线数随着整治比例的增大而减小,与未整治流域相比,整治比例为 20%时的径流曲线数减小了 6.77。就分段整治比例而言,流域径流曲线数的减小速率呈现先增大后减小的趋势:整治比例由 0.5%增大至 5%时,流域径流曲线数的减小速率是最大的,此时整治比例每增大 1%,流域径流曲线数减小 0.49;整治比例由 15%增

大至 20%时,整治比例每增大 1%,流域径流曲线数减小 0.10,此时沟道土地整治工程对流域径流曲线数的影响正逐步减小。

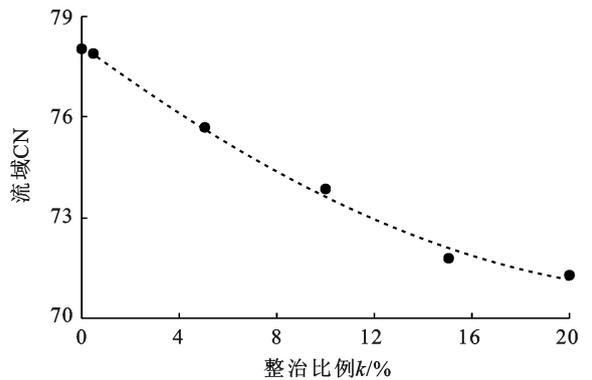


图 2 同一覆盖度下流域径流曲线数的变化

2.1.2 不同整治比例和植被覆盖下流域径流曲线数的变化 不同植被覆盖度条件下,沟道土地整治对流域径流曲线数的作用并不是完全相同的。图 3 为不同植被覆盖条件下,流域径流曲线数随着整治比例变化的规律。

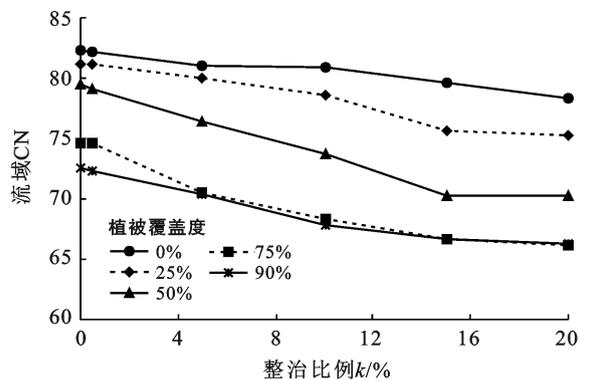


图 3 不同整治比例和植被覆盖度的流域径流曲线数

由图 3 可知,各植被覆盖条件下流域径流曲线数均随着整治比例的增大而减小。植被覆盖度为 0%时,整治比例每增大 1%,流域径流曲线数减小 0.20。植被覆盖度为 25%,50%,75%以及 90%时,该值分别为 0.29,0.46,0.42,0.31。在植被覆盖度增大的过程中,沟道土地整治对流域径流曲线数的影响先增大

后减小,在植被覆盖度为 50% 时,沟道土地整治实施后流域径流曲线数的减小速率最大,可见并不是植被覆盖度愈大减水效果就愈好,水保措施之间的最佳配置方式仍需要进一步探讨。

## 2.2 沟道土地整治区域径流曲线数的变化分析

为探究植被覆盖度对沟道土地整治区域径流曲线数的影响,根据产流结果与每场试验中草地和沟道土地整治区域的面积占比,试算得各植被覆盖条件下二者的径流曲线数如图 4 所示。由图 4 可知,在同一植被覆盖度下,草地的径流曲线数始终大于沟道土地整治区域。为了研究径流曲线数与植被覆盖度之间的关系,对径流曲线数与植被覆盖度进行相关分析,结果见图 4。 $R^2$  分别为 0.93 和 0.96,二者呈显著的线性关系,沟道土地整治区域与草地的径流曲线数均随着植被覆盖度的增大呈线性减小趋势,植被覆盖度每增大 1%,沟道土地整治区域的径流曲线数减小 0.22,草地的径流曲线数减小 0.23。

## 2.3 岔巴沟流域径流曲线数验证

为了验证上述径流曲线数的变化规律,构建了岔巴沟的 SWMM 流域模型。选用黄土高原中部子洲县 2017 年 7 月 26 日的降雨进行模拟。模型需要输入的参数有径流曲线数、面积、宽度、坡度、不渗透性、渗透性粗糙系数、渗透性洼地蓄水等。根据前 5 d 的

总降雨量确定流域前期湿润等级为 AMC II,水文土壤类型为 B 类。岔巴沟各子流域的植被覆盖度为 20%~40%,土地利用类型有林地、草地、耕地、建设用地以及沟道土地整治区域等。依据实体模型不同植被覆盖度和整治比例试验结果初步选定沟道土地整治区域的径流曲线数,其余土地利用类型径流曲线数通过查表获得,面积加权平均可得各子流域的径流曲线数,模型主要参数的选取详见表 2。图 5 为模拟和实测流量的对比结果。由图 5 可知,小洪峰峰值的相对误差为 4.02%,峰现时间一致,大洪峰峰值的相对误差为 1.89%,峰现时间相对误差为 4.17%,NSC 为 0.85,流量计算满足精度要求。

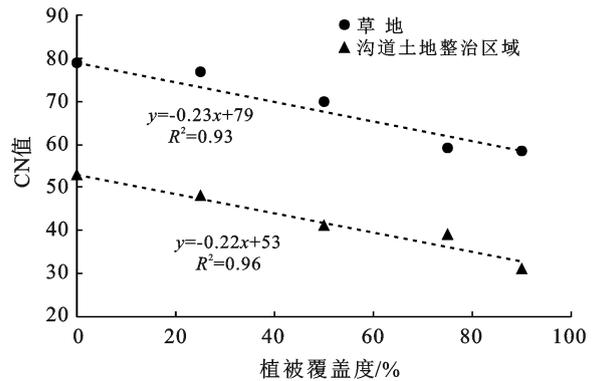


图 4 沟道土地整治区域和草地的径流曲线数

表 2 SWMM 模型的主要参数取值

子流域编号	面积/hm <sup>2</sup>	宽度/m	整治比例/%	不渗透性/%	渗透性洼地蓄水/mm	CN 值
1	2 249	4 166	0.07	0.23	30	72.78
2	2 092	2 234	0.12	0.69	30	69.99
3	5 563	3 039	0.40	0.25	30	72.79
4	1 749	1 775	0.00	1.53	36	70.08
5	3 605	7 282	3.10	2.28	36	68.41
6	2 023	4 050	2.40	5.76	36	68.86
7	5 215	11 239	2.80	1.34	45	69.49
8	1 670	4 278	1.29	5.86	45	69.20
9	137	2 284	7.77	1.46	45	66.98

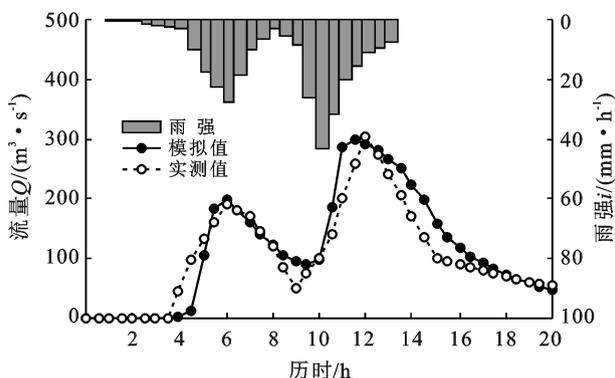


图 5 实测流量与模拟流量的对比

将各子流域的整治比例与径流曲线数点绘于图 6。由图 6 可知,子流域径流曲线数基本随着整治比例的增大呈减小趋势,但图 6 中也有些值不符合上述规律,其原因是子流域径流曲线数受到多种土地利用类型的影响,如梯田、建设用地等。总体来说数学模型验证结果较好,可见实体比尺模拟研究获得的径流曲线数规律可用于岔巴沟流域洪水计算。

## 3 讨论

### 3.1 沟道土地整治对径流曲线数的影响

流域的径流曲线数受到诸多因素的影响,如坡

度、植被覆盖条件以及土地利用类型等因素。本研究结果表明沟道土地整治后流域的径流曲线数减小,究其原因为:①沟道土地整治使得沟道局部坡度减小,这使得单位面积的实际承雨量变大,势能差减小,坡面水流流速降低,降雨入渗量会有所增加;②沟道土地整治工程的新增土地来源于削坡土壤,压实标准和土体密度低、孔隙率大、连通性强,更有利于降雨入渗。本研究试验得裸坡条件下沟道土地整治区域的径流曲线数为 53,通过娄现勇以及孙彭成等<sup>[5-6]</sup>所做的室内水槽人工降雨试验数据反算得裸坡条件下沟道土地整治区域的径流曲线数分别为 77.04 和 58.54,本文结果与后者较为相近,与前者差距较大的原因是该研究虽在土槽中间添加 PVC 挡板为模拟坝体,但坝体数量并未随整治比例的增大而增加,这与实际流域有一定出入,而孙彭成等人的试验中在  $k$  为 30% 和 60% 时分别为主沟道设置一个和两个田坎,相比之下更好地还原了沟道土地整治流域的工程布设。除沟道土地整治外,流域治理还包括鱼鳞坑、水平沟以及反坡梯田等造林整地工程,但整地后流域 CN 值的研究仍比较少见。

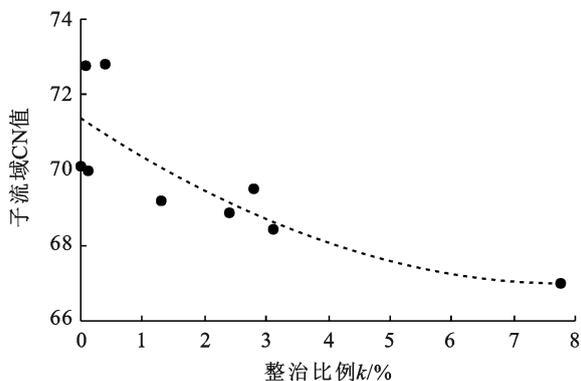


图6 子流域径流曲线数与整治比例的关系

### 3.2 水土保持工程的合理配置

本文研究表明植被覆盖度为 50% 时,沟道土地整治后径流曲线数的减小速率是最大的,这表明流域前期植被覆盖度对沟道土地整治工程的减流效果影响显著。冯憬等<sup>[19]</sup>对陇中地区径流小区实测数据的分析结果也表明径流曲线数与植被覆盖度呈负相关关系。Katrien 等<sup>[20]</sup>通过分析埃塞俄比亚不同植被恢复阶段坡地的径流曲线数,提出了两种植被覆盖度和径流曲线数的回归函数关系,径流曲线数均随着植被覆盖度的增大而减小。以上研究均表明植被覆盖对径流曲线数的影响是不可忽略的,因此沟道土地整治工程的设计应充分考虑不同流域现有植被覆盖情况的影响,但目前国内对植被覆盖度与径流曲线数的

关系研究仍较少。此外,流域植被覆盖度和沟道土地整治比例的最佳配置不能以减流作为单一工程效益目标,还应考虑到泥沙治理、农作物灌溉需求、林草存活率以及流域污染治理等多方面的问题。同时,水土保持工程的效益也会因各个流域不同的水文、地形地质、气象条件等而发生变化。因此,在今后的研究中要加强对流域水土保持工程最优配置及效益评价的研究,为提高研究效率,可考虑借助数学模型进行多情景研究。

## 4 结论

(1) 同一植被覆盖度下,流域径流曲线数随着整治比例的增大而减小。与未整治流域相比,整治比例为 20% 时的流域径流曲线数减小了 6.77。就分段整治比例而言,随着整治比例的增大,流域径流曲线数的减小速率呈现先增大后减小的趋势,整治比例由 0.5% 增大至 5% 时,流域径流曲线数的减小速率最大。

(2) 不同植被覆盖度下,沟道土地整治对流域径流曲线数的作用并不完全相同。不同植被覆盖度下流域径流曲线数均随着整治比例的增大而减小,植被覆盖度为 50% 时沟道土地整治后流域径流曲线数的减小速率最大。

(3) 植被覆盖度对沟道土地整治区域的径流曲线数影响显著。同一沟道土地整治比例下径流曲线数随着植被覆盖度的增大呈线性减小趋势,植被覆盖度每增大 1%,沟道土地整治区域的径流曲线数减小 0.22,该规律在数学模型中应用结果良好。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 刘彦随,李裕瑞.黄土丘陵沟壑区沟道土地整治工程原理与设计技术[J].农业工程学报,2017,33(10):1-9.
- [2] Liu Yansui, Guo Yanjun, Li Yurui. GIS-based effect assessment of soil erosion before and after gully land consolidation: A case study of Wangjiagou project region, Loess Plateau [J]. Chinese Geographical Science, 2015, 25(2):137-146.
- [3] Li Peiyue, Qian Hui, Wu Jianhua. Accelerate research on land creation [J]. Nature, 2014, 510(7503):29-31.
- [4] Liu Yansui, Li Yuhun. China's land creation project stands firm [J]. Nature: International Weekly Journal of Science, 2014, 511(7510):410-410.
- [5] 娄现勇,高建恩,韩赛奇,等.黄土丘陵沟壑区沟道土地整治工程对流域产汇流的影响[J].水电能源科学,2016,34(10):23-27.
- [6] 孙彭成,高建恩,韩赛奇,等.黄土丘陵沟壑区沟道土地整治对径流—泥沙—氮素排放影响的模拟研究[J].农业环

- 境科学学报, 2017, 36(6): 1177-1185.
- [7] 张鑫, 张青峰, 周阳阳, 等. 不同坡度黄土微地形条件下 SCS-CN 模型参数研究[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2): 74-77.
- [8] 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.
- [9] 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, 146.
- [10] 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.
- [11] Liu Xianzhao, Li Jiazhu. Application of SCS model in estimation of runoff from small watershed in Loess Plateau of China [J]. Chinese Geographical Science, 2008, 18(3): 235-241.
- [12] Huang Mingbin, Gallichand J, Wang Zhanli, et al. A modification to the soil conservation service curve number method for steep slopes in the Loess Plateau of China [J]. Hydrological Processes, 2006, 20(3): 579-589.
- [13] 罗利芳, 张科利, 符素华. 径流曲线数法在黄土高原地表径流量计算中的应用[J]. 水土保持通报, 2002, 22(3): 58-61, 68.
- [14] 王英, 黄明斌. 径流曲线法在黄土区小流域地表径流预测中的初步应用[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(6): 87-91, 97.
- [15] 邓景成, 高鹏, 穆兴民, 等. 模拟降雨条件下黄土区 SCS 模型的参数率定[J]. 水土保持研究, 2018, 25(5): 205-210.
- [16] 高建恩, 吴普特, 牛文全, 等. 黄土高原小流域水力侵蚀模拟试验设计与验证[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 41-45.
- [17] 李琪, 马建斌, 刘洪吉. 基于逐步回归的投影寻踪水文预报模型研究[J]. 水电能源科学, 2011, 29(2): 10-12.
- [18] 陈虹, 李家科, 李亚娇, 等. 暴雨洪水管理模型 SWMM 的研究及应用进展[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(12): 225-234.
- [19] 冯憬, 卫伟, 冯青郁. 黄土丘陵区 SCS-CN 模型径流曲线数的计算与校正[J]. 生态学报, 2021, 41(10): 4170-4181.
- [20] Katrien D, Jean P, Lorenzo B, et al. Runoff curve numbers for steep hillslopes with natural vegetation in semi-arid tropical highlands, Northern Ethiopia [J]. Hydrological Processes, 2008, 22(20): 41-45.

(上接第 45 页)

- [18] 殷水清, 薛筱婵, 岳天雨, 等. 中国降雨侵蚀力的时空分布及重现期研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 105-113.
- [19] 刘世全, 张明. 区域土壤地理[M]. 四川 成都: 四川大学出版社, 1997.
- [20] 邹国础, 杨云. 黄壤分类的商榷[J]. 土壤, 1978(5): 189-190.
- [21] 戴海伦, 苑爽, 张科利, 等. 贵州省降雨侵蚀力时空变化特征研究[J]. 水土保持研究, 2013, 20(1): 37-41.
- [22] 罗旭玲, 白晓永, 谭秋, 等. 不同岩性背景下土壤侵蚀与石漠化关联性分析[J]. 生态学报, 2018, 38(24): 8717-8725.
- [23] 蔡雄飞. 我国西南喀斯特地区黄壤侵蚀影响因素分析及数值模拟[D]. 贵州 贵阳: 贵州师范大学, 2007.
- [24] 纪启芳, 张兴奇, 张科利, 等. 贵州省喀斯特地区坡面产流产沙特征[J]. 水土保持研究, 2012, 19(4): 1-5.
- [25] 郭继成, 张科利, 董建志, 等. 西南地区黄壤坡面径流冲刷过程研究[J]. 土壤学报, 2013, 50(6): 1102-1108.
- [26] 张文源, 王百田, 杨光熈, 等. 喀斯特黄壤区侵蚀性降雨及产沙特征分析[J]. 生态环境学报, 2014, 23(11): 1776-1782.
- [27] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 20486-2017 江河流域面雨量等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.

(上接第 53 页)

- [39] 徐炜杰, 郭佳, 赵敏, 等. 重金属污染土壤植物根系分泌物研究进展[J]. 浙江农林大学学报, 2017, 34(6): 1137-1148.
- [40] Zeng Fanrong, Chen Song, Miao Ying, et al. Changes of organic acid exudation and rhizosphere pH in rice plants under chromium stress [J]. Environmental Pollution, 2008, 155(2): 284-289.
- [41] Wang J, Zhang C B, Jin Z X. The distribution and phytoavailability of heavy metal fractions in rhizosphere soils of *Paulownia fortunei* (seem) Hems near a Pb/Zn smelter in Guangdong, PR China [J]. Geoderma, 2009, 148(3): 299-306.
- [42] Xiao Min, Wu Fengchang. A review of environmental characteristics and effects of low-molecular weight organic acids in the surface ecosystem [J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, 26(5): 935-954.
- [43] 付广义, 邱亚群, 宋博宇, 等. 东江湖铅锌矿渣堆场优势植物重金属富集特征[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(4): 117-122.