

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2015.02.005

植被分布对小流域产流影响的数值实验

李妍敏, 安 翼, 刘青泉

(中国科学院力学研究所流固耦合重点实验室, 北京 100190)

摘要: 基于二维运动波模型, 建立了一个适用于小流域场次降雨产汇流过程的动力学模型。通过对典型小流域内不同区域(坡顶、坡中及坡底区域及距离流域出口的远近)种植植被时产流过程的数值模拟, 分析了小流域内植被分布对产流过程的影响。结果表明: 植被分布及其特性对小流域场次降雨产流有较明显的影响; 下游区域种植植被的减水效果和延滞洪峰作用优于上游区域, 陡坡区域减水效果优于缓坡区域, 且郁闭度越大, 这种差别越明显; 在该研究条件下, 下游区的减水效果可达到上游区的 3 倍; 30%郁闭度条件下减水效果可达 10%和 20%郁闭度条件下的 3 倍和 1.4 倍。

关键词: 小流域; 降雨产流; 动力学模型; 植被分布; 郁闭度; 减水效果

中图分类号: P333.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2015)02-0187-09

自 20 世纪 50 年代以来, 水土保持逐渐形成了以小流域为基本单元, 生物、工程、耕作措施相结合的综合治理方案^[1], 其中不同的植被种植方案具有不同的水土保持效果。因此, 深入探讨小流域内植被分布对产流过程的影响, 对合理设计生物措施方案具有重要指导意义。目前针对植被水土保持效果的研究主要在坡面和小流域尺度开展。如游珍和李占斌^[2]通过坡面人工降雨实验, 比较了植被在坡面不同位置、聚集大小和形态所产生的水保效益, 发现植被的水保效果并不简单地由植被面积所控制, 还与植被位置和分布密切相关。刘窑军等^[3]发现在边坡上草木和草灌的结合具有显著的截流拦沙效果。高光耀等^[4]、Fu 和 Chen^[5]发现, 坡面单元不同的入渗特性会导致流域中径流产生区和非径流产生区的空间分隔分布。Zheng 等^[6]认为, 在流域尺度植被对水沙的影响是通过减少产流量来实现的。史晓亮等^[7]认为流域内林地向耕地草地的变化导致了地表径流空间差异显著, 且总径流增加。

事实上小流域的复杂地形地貌使得不同区域植被所产生的产流响应过程有很大不同。坡顶区域的产流常受非饱和入渗的影响, 而坡中和坡底的汇流集中区则可能更早达到饱和入渗或满蓄状态; 在径流发生和汇流过程中, 汇流集中区域的植被增阻效应比其他区域更为显著; 靠近流域出口区域产生的洪峰将更直接地体现在小流域出口的洪水过程中, 而上游区域的洪峰则可在沟道洪水演进中逐渐消散和平均化。因此十分有必要深入探讨这些过程中的动力学机制及其规律。

近年来, 分布式小流域产流模型得到了快速发展, 为研究这些问题提供了可能手段和有效方法。如贾媛媛等^[8]、李文杰等^[9]、曹文洪等^[10-11]分别建立了有特色的基于物理过程的分布式小流域产流模型, 来模拟非均匀下垫面条件下流域产流产沙过程。Liu 等^[12-13]将运动波模型推广到二维, 建立了坡面产流的二维动力学模型, 较好地刻画了非均匀下垫面对产汇流过程的影响, 不仅能描述网格内植被影响的时间过程, 更能反映植被对网格间汇流过程的影响。

收稿日期: 2014-08-05; **网络出版时间:** 2015-03-16

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20150316.1453.005.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11202216; 11432015)

作者简介: 李妍敏(1986—), 女, 陕西合阳人, 博士研究生, 主要从事流域水文模型方面研究。

E-mail: liyanmin@imech.ac.cn

通信作者: 刘青泉, E-mail: qqliu@imech.ac.cn

为此,本文基于Liu等^[12-13]的二维动力学产流模型,进一步考虑植被截留和植被增阻等效应,发展了能合理描述不同植被条件下降雨产流过程的小流域产流二维动力学模型;通过对不同植被分布条件下小流域产流过程的数值模拟实验,探讨植被特征和分布对小流域产流的影响机理和规律。

1 小流域产流二维动力学模型

模型将小流域中的坡面和沟道作为两类单元来描述。采用二维网格将整个小流域划分为若干坡面单元,而沟道单元作为不计面积的线单元存在于坡面单元之间,坡面和沟道单元之间通过汇流关系连接。模型具体包括坡面二维产汇流、植被截留增阻、土壤入渗以及沟道汇流这4个子模型。

1.1 坡面产流汇流模型

为了合理描述坡面流的产流和汇集过程,Liu等^[12]基于坡面单元内的流向矢量分解,提出了带扩散波修正的二维运动波模型,其控制方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = p_e \\ q = uh = h^{5/3} S_f^{1/2} / n \end{cases} \quad (1)$$

式中 h 为坡面流水深, m; q 为单宽流量, m^2/s ; p_e 为有效雨强, m/s ; n 为坡面 Manning 系数, $\text{s}/\text{m}^{1/3}$; S_f 为水力坡降, 基于坡度 S_0 和扩散波修正确定; q_x 、 q_y 分别为 x 、 y 方向的单宽流量, $q_x = q \cos \gamma$, $q_y = q \sin \gamma$, γ 为流动方向与 x 方向的夹角。

天然降雨经过蒸发蒸腾、植被截留、土壤入渗和地表填注等水文过程损失了部分降雨,只有剩余的部分在重力作用下形成地表径流。为此,考虑植被截留、土壤入渗以及坡度影响,式(1)中的有效降雨强度 p_e 可表示为

$$p_e = p \cos \theta - J_t - i \quad (2)$$

式中 p 为自然雨强, m/s ; θ 为坡面坡度; J_t 为 t 时刻的植被截留强度, m/s ; i 为土壤入渗率, m/s 。

应用该模型计算时,首先在坡面上划分二维网格(图1(a)),在每个单元网格计算产流过程及水深、流量等水力参数(图1(b)),然后根据网格的倾向及相邻单元的积水条件确定水流方向,并将流量在 x 、 y 方向上分解(图1(c)),并汇入相邻单元。

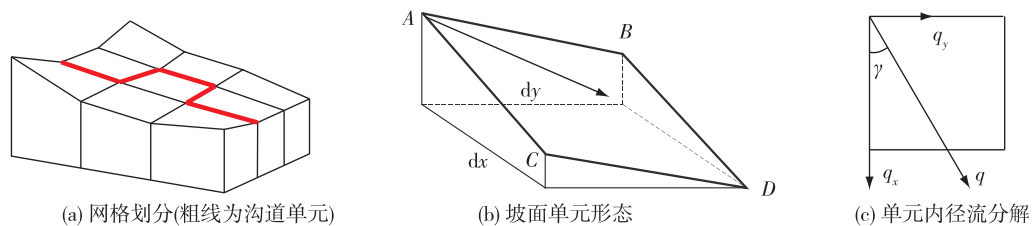


图1 网格单元和径流分解示意

Fig. 1 Sketch of mesh and the runoff decomposition method in each cell

式(1)中 γ 决定单元内流动的分解,根据经过积水修正后的网格4角点高程 z_A 、 z_B 、 z_C 和 z_D 确定:

$$\tan \gamma = \frac{dx \left[\frac{z_A + z_C - z_B - z_D}{z_A + z_B - z_C - z_D} \right]}{dy} \quad (3)$$

1.2 植被截留延阻模型

忽略植被对土壤理化性质改变对土壤入渗过程的影响,植被对坡面产流的影响主要表现为对降雨的截留作用和对坡面流的阻滞作用。可以分别采用植被截留强度和植被地表曼宁阻力系数来表达。

1.2.1 植被截留强度

在场次降雨的短时间内,主要考虑植被树冠枝叶的截留作用,与反映截留容量的植被特性(如树种、茂密度等)和影响实际截留量的气象因素(如降雨量、降雨强度等)有关。研究表明,植被冠层枝叶拦截并释放

出雨水的截留过程和土壤入渗过程很相似, 可以用 Horton 渗透方程来描述:

$$J_t = J_c + (J_0 - J_c)e^{-\alpha t} \quad (4)$$

式中 J_c 为植被的稳定截留强度, mm/h; J_0 为初始截留强度, mm/h; α 为衰减系数, 表征植被冠层特征。

杨立文等^[14]通过对林冠截留过程的观测研究发现, 初始截留强度 J_0 与降雨强度 p 和树冠郁闭度 A 有直接关系, 可表示为 $J_0 = Ap$ 。该公式推导时采用平均雨强, 为消除雨强大小差异带来的误差, 以每小时为时间段, 分别计算各时间段的平均降雨强度, 以此来确定 J_0 。 J_c 则较稳定, 与林木种类没有明显的关系, 近似为一个恒定值, 经验取值 $J_c = 0.48$ mm/h; 衰减系数 α 与降雨强度和树种有关。

1.2.2 植被阻力

坡面径流遇到较大植被枝干形成绕流产生局部水头损失, 较小植被和落叶增大了地表粗糙度, 并对径流有吸附、滞缓作用。为了有效表达植被的延阻作用, 模型中将其统一概化为地表阻力系数。

张洪江等^[15]对晋西地区几种常见林地的阻力特征进行了研究, 得到了不同林分作用下地表的曼宁阻力系数。结合现有土地利用方式, 对这些参数进行筛选, 得到的参考阻力系数如表 1 所示。

表 1 不同林分作用下坡面的糙率系数取值

s/m^{1/3}

Table 1 Roughness coefficients for different land use situation

林分类型	用材林	灌木林	荒山荒坡	治理林地	零星林地	水平梯地	水田
曼宁糙率系数	0.091 2~0.225 3	0.118 3~0.214 2	0.061 0~0.067 0	0.058 4~0.105 1	0.040 0~0.100 0	0.020 0~0.039 3	0.020 0~0.039 3

1.3 土壤入渗模型

影响土壤入渗的主要因素包括土壤饱和导水率、土壤初始含水量和饱和含水量、累计入渗量, 以及土壤特性等。本文使用能够较好反映这些影响因素改进的 Green-Ampt 模型描述土壤入渗过程:

$$i = \begin{cases} p_i & t < t_p \\ K[1 + (\theta_s - \theta_i)S/I] & t > t_p \end{cases} \quad (5)$$

$$I = K(t - t_p) + I_p + S(\theta_s - \theta_i) \ln \left(\frac{I + S(\theta_s - \theta_i)}{I_p + S(\theta_s - \theta_i)} \right) \quad (6)$$

式中 i 为土壤入渗率, m/s; p_i 为降落到地面的净雨强, $p_i = p \cos \theta - J_r$, m/s; K 为土壤的饱和渗透系数, m/s; θ_s 和 θ_i 分别为土壤的饱和含水率和初始含水率; S 为湿润峰处的土壤吸力, m; I 为总入渗量, m; $t_p = I_p / p_i$ 为地表开始积水的时间, s; I_p 为地表开始积水时的累计入渗量, 表达式为

$$I_p = \frac{(\theta_s - \theta_i)S}{(p_i/K) - 1} \quad (7)$$

实际中的降雨往往不恒定, 导致地表积水发生间歇性变化, 模型将入渗过程分为多个微小的时间段, 根据时段始末的总降雨量、总入渗量及总积水量判断地表的流动状态, 进而计算该时段内的土壤入渗过程, 将入渗模型应用到非恒定降雨中。此外, 模型还考虑了地表水流对入渗过程的影响。

1.4 沟道汇流模型

坡面径流最终会入汇沟道。本文沟道宽度远小于坡面网格尺寸, 模型中将沟道单元模化为嵌在坡面单元之间的无宽度线单元, 与相邻坡面单元边界重合, 并尽量使其流动路径和实测的沟道相接近(图 1(a))。与沟道相邻坡面单元的坡面流通过流动分解, 以与沟道垂直的方向入汇到沟道中。沟道水流的水力条件和明渠流类似, 模型中将沟道水流按明渠流来处理, 并基于自然河相关系, 用一维扩散波方程来计算水流的演进过程。其水流运动控制方程为

$$Q = \frac{B S_{0r}^{1/2} H^{5/3}}{n_r} \quad (8)$$

式中 Q 为沟道流量, m³/s; n_r 为沟道曼宁阻力系数, s/m^{1/3}; S_{0r} 为沟道比降; H 为沟道等效过水断面水深,

m ; B 为沟道等效过水断面宽度, 取 $B = 4.84\sqrt{H}$, m 。

1.5 模型的率定与验证

选取陕西省镇巴县东南部的黑草河小流域(见图 2(a))来验证本文的产流模型。该小流域面积为 24.85 km^2 , 流域出口建有大田包水文站^[10-11]。模拟时将黑草河小流域按照 $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ 的网格大小划分为 593 个坡面单元, 每个单元的下垫面信息以及降雨、产流资料, 采用文献[10-11]的数据整理得到。在本文分辨率条件下, 该小流域坡面的众值坡度约为 20° , 最大坡度为 38° , 下游区域坡顶处坡度较大。

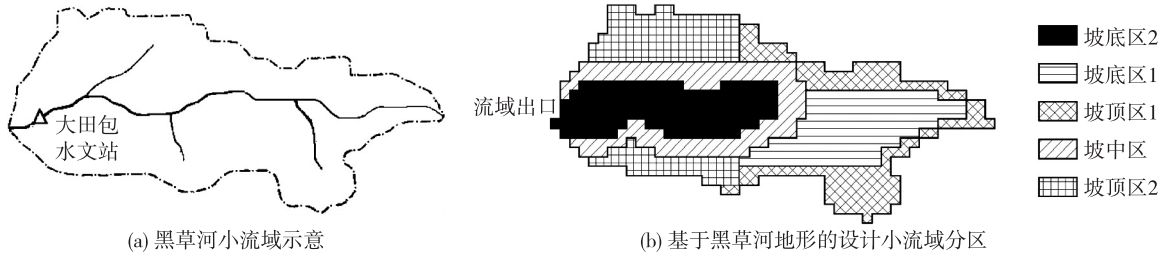


图2 黑草河小流域示意及设计小流域的分区

Fig. 2 Sketch of the Heicaohu catchment and designed catchment based on its topography

1.5.1 模型率定

选取 1984 年 9 月 6 日和 1985 年 9 月 15 日两次降雨对模型进行率定。参考曹文洪等^[10-11]对黑草河小流域的研究, 土壤饱和含水率取为 51.8% , 湿润锋面处土壤吸力为 0.02 m ; 1984 年 9 月 6 日降雨前期有连续降雨, 土壤的前期含水量取为 49.6% ; 而 1985 年 9 月 15 日的降雨, 前期有较小的降雨, 土壤初始含水量取为 21.6% 。两次模型计算的时间步长均为 $\Delta t = 10 \text{ s}$ 。

基于以上参数, 对上述两场降雨的产流过程进行了模拟计算, 通过与大田包水文站观测的流量过程进行对比(图 3(a)、图 3(b)), 分析率定了两场降雨条件下坡面和沟道的曼宁阻力系数, 率定值的范围符合小流域的土地利用类型条件(见表 1)。

1.5.2 模型验证

利用上述率定的参数对 1985 年 5 月 11 日的场次降雨过程进行模拟。考虑到 1985 年 5 月 11 日的降雨前期久无降雨, 土壤含水量低, 取为 4.8% , 其他参数和上述率定参数一致。对大田包水文站处流量过程进行模拟计算, 模拟结果与观测结果比较, 符合良好(图 3(c)), 验证了模型的适用性。

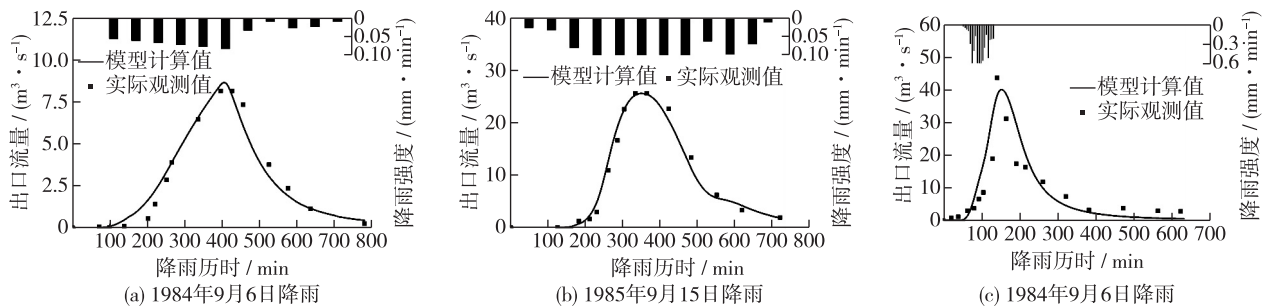


图3 大田包站实测与计算流量过程比较

Fig. 3 Comparison of calculated and measured discharge processes at Datianbao station

2 植被分布影响的数值实验

在建立小流域二维动力学产流模型的基础上, 本文基于黑草河小流域的地形数据设计了用于开展数值实验用的设计小流域。以沟道为参考, 将整个设计小流域划分为投影面积基本相等的 5 块(图 2(b)): 坡顶区 1、

坡底区 1、坡顶区 2、坡中区和坡底区 2, 各区的投影面积分别为 4.76 km²、4.80 km²、4.68 km²、4.72 km² 和 4.72 km², 总投影面积为 23.68 km²。在这 5 块区域分别种植植被, 进而探讨植被在坡面上不同位置以及在小流域中的不同位置对小流域产流带来的影响。

以少植被的荒山改造为背景, 考虑在 5 个区域分别种植植被, 并根据植被的生长期, 设置了植被树冠郁闭度分别为 10%、20%、30% 3 种情况, 同时针对不考虑植被阻力作用和考虑植被导致的地表阻力相应增大 20%、40%、60% (对应于 10%、20%、30% 3 种郁闭度) 两种情况, 设计了 3×2×5=30 种植被种植方案。在雨强为 0.12 mm/min 的均匀降雨条件, 模拟计算小流域的产流过程, 探讨植被特征及分布对产流过程的影响。

为了便于比较, 以小流域种植植被前的荒山条件作为参比基准, 首先模拟了雨强为 0.12 mm/min 的均匀降雨条件下小流域的产流过程, 此时土壤初始含水量为 49.6%, 饱和含水量为 51.8%, 湿润锋面处土壤吸力为 0.02 m。

图 4 给出了几种典型条件下小流域出口的产流过程。从图 4 可以看出, 有植被条件下流域的产流量和洪峰值均减小, 植被发挥了减少产流量和削减洪峰的作用。而植被种植位置的不同, 对产流过程的影响及减水效果也不同, 坡中区的植被具有更好的减水和削减洪峰作用。

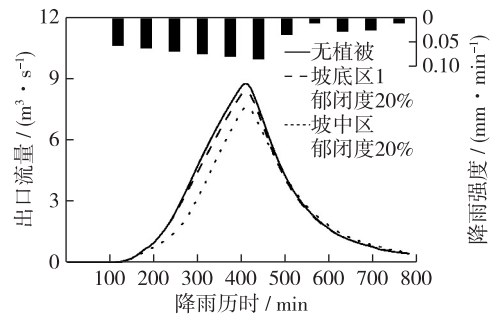


图 4 不同设计条件下的产流过程比较

Fig. 4 Comparison of runoff processes in different cases

3 结果和讨论

3.1 植被位置对产流的影响

植被的截留作用对流域产流有明显影响, 为了定量分析不同位置种植植被对流域产流的影响, 可用基准方案总径流量与当前方案总径流量的差值与两种方案水土保持措施改变面积的比值来表示当前方案的减水效果。

图 5(a) 给出了不考虑植被增阻作用时, 5 个不同区域内分别种植植被在不同郁闭度条件下的减水效果。计算结果表明, 不同的植被种植位置对流域产流的减水效果不同。总体而言, 本例条件下在靠近流域出口的区域种植植被的减水效果大于在远离流域出口的区域种植植被的减水效果, 而坡底区 1 和坡顶区 1 之间, 以及坡中区和坡顶区 2 之间的减水效果差别不大。在各种郁闭度条件下, 远离流域出口区域的减水效果只有靠近流域出口区域减水效果的 1/3 左右。

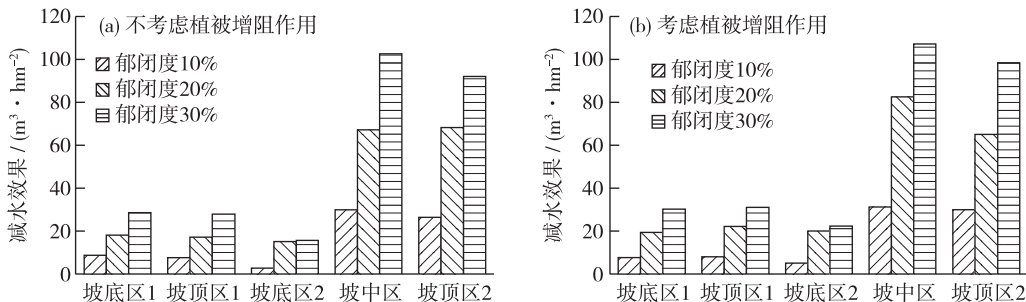


图 5 不同郁闭度条件下 5 个区域植被的减水效果比较

Fig. 5 Vegetation runoff reduction efficiency in the designed regions

分析小流域的地形发现, 靠近流域出口的区域除了坡底区 2 外, 其他区域的坡度均比较大, 较大的坡度导致了单位地表面积上降雨强度较小, 坡度影响和等效雨强的减小加强了植被截留以及土壤入渗的效率, 进而减小了在这些区域的地表径流量, 使得减水效果提高。这也说明在坡度较大的区域种植植被更有利于发挥截留、入渗的作用, 从而拦截较多的降雨, 进而减少流域出口径流量。同时, 在坡度较大的下游区, 水流汇集速度快, 而植被的存在导致该区域内径流的速度明显减缓, 土壤入渗量增多, 从而有效地减小了径流量。此外模拟计算结果还显示, 不同的植被郁闭度具有不同的减水效果, 总体上, 随着植被郁闭度的增大, 植被减水效果随之增大。

图 5(b) 给出了考虑植被增阻作用时, 5 个不同区域内分别种植植被在不同郁闭度条件下的减水效果。计算结果同样显示了与上述结果类似的规律, 说明在本例条件下植被的增阻作用对流域产流并无明显的减水作用, 而可能主要起到延滞洪峰的作用。

3.2 植被郁闭度对产流的影响

植被的郁闭度在很大程度上影响着植被的截留能力, 与植被类型、种植的间距和生长年限等因素有关。为了更好地从郁闭度角度反映植被截留对流域产流的影响, 以油松作为参考植被, 计算分析了植被郁闭度分别为 10%、20% 和 30% 条件下的产流过程。

表 2 列出了不考虑植被增阻作用条件下, 5 个区域种植植被的减水效果随植被郁闭度而变化, 即随着郁闭度的增大, 植被的减水效果逐渐增加。事实上, 植被的截留大小取决于截留能力, 郁闭度越大, 植被拦截雨水的面积越大, 被拦截的雨水也越多, 产生的径流量会越小, 减水效果越大, 导致郁闭度与减水效果之间基本上呈正比例关系。

表 2 植被增阻作用对减水效果的影响 m³/万 m²
Table 2 Effect of extra drag from vegetation on runoff reduction efficiency

植被种植位置	不考虑植被增阻作用			考虑植被增阻作用		
	郁闭度 10%	郁闭度 20%	郁闭度 30%	郁闭度 10%	郁闭度 20%	郁闭度 30%
坡底区 1	8.93	18.33	28.50	7.88	19.52	30.25
坡顶区 1	7.80	17.35	27.97	8.21	22.32	31.02
坡底区 2	2.94	15.34	15.77	5.22	20.15	22.15
坡中区	30.05	67.27	102.87	31.31	82.67	106.89
坡顶区 2	26.42	68.23	91.80	30.08	65.10	98.11

以郁闭度为 30% 时的减水效果为基准, 进一步分析发现, 除了坡底区 2 外, 其他 4 个区域中, 10% 郁闭度条件下各区域的减水效果均约为 30% 郁闭度下对应区域减水效果的 30%; 同样, 20% 郁闭度条件下各区域的减水效果均约为 30% 郁闭度下对应区域减水效果的 70%, 区域之间基本没有明显差别。

表 2 还给出了在考虑植被阻力变化条件下, 小流域 5 个区域植被在郁闭度为 10%、20% 和 30% 时的减水效果, 得到和上面类似的结果。

3.3 植被对径流的延滞作用

植被除了具有截留减水作用外, 对地表径流还具有延滞作用。为了定量比较不同方案中植被对径流的延滞作用, 用当前方案洪峰出现时间与基准方案洪峰出现时间的差值来定义量化的延滞效果。

设定出口流量达到最大流量值的 95% 时为洪峰出现的时间, 得到各方案的延滞效果如表 3 所示。可以发现, 仅考虑植被截留而不考虑植被增阻作用时, 流域出口的洪峰出现时间也会产生延后效应; 同时考虑植被截留和植被增阻作用时, 植被对径流洪峰的延滞作用更加显著。这也说明植被对径流洪峰的延滞作用体现在两个方面, 一方面, 由于植被的截留作用使得产流时间延后, 同时植被截留也使得产流量减小, 洪峰传播速度也有所减小, 从而延缓了洪峰到达时间; 另一方面, 植被增大了坡面粗糙度, 延长了水流聚集时间, 导致洪峰到达时间延后。模拟结果表明, 后一个作用对径流洪峰的延滞作用更加显著。

表 3 不同郁闭度条件下各区域延滞效果对照
Table 3 Flood peak delay effects of vegetation for different crown closures

郁闭度/%	是否考虑 增阻作用	坡底区 1	坡顶区 1	沟道周围	坡中区	坡顶区 2
10	否	-0.89	0.88	0.01	-0.21	1.39
	是	2.36	0.43	3.82	7.50	7.53
20	否	1.53	1.15	0.16	1.84	4.09
	是	6.25	1.57	7.73	10.48	13.00
30	否	3.05	-0.47	0.23	2.40	3.62
	是	9.60	1.84	11.51	23.41	19.30

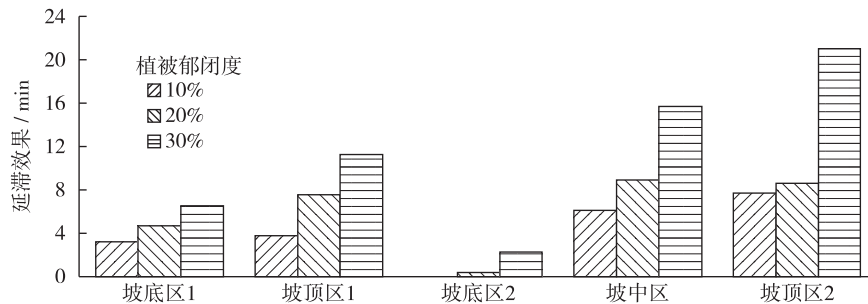


图 6 植被种植区域不同对径流洪峰的延滞效果比较

Fig. 6 Flood peak delay effects of vegetation for different plantation zones

为了更加清楚地了解植被增阻对径流的延滞作用, 扣除由于植被截留产生的延滞作用, 得到不同区域不同郁闭度条件下植被增阻对径流的延滞效果, 如图 6 所示。

可见, 不同区域种植植被对径流具有不同的延滞作用; 在本文研究尺度条件下, 坡度较大的坡中区、坡顶区 2 区域, 其延滞作用最为明显; 在水流较易汇集的坡底区 1 以及坡底区 2 的延滞作用也比较显著; 相对而言, 坡度较缓的坡顶区 1 植被的延滞作用最弱。可见, 在地形较陡、流路较为集中的区域种植植被对延缓径流具有更好的作用。同时, 模拟结果表明, 植被的郁闭度对径流的延滞作用也有明显的影响, 一般地, 随着植被郁闭度的增加, 植被的延滞作用呈现明显增强的趋势。

4 结 论

(1) 植被对小流域产流具有明显的减水削峰作用, 不同的植被分布具有不同的减水效果。在本文的研究条件下, 下游区域的植被减水效果优于上游区域, 减水效果可达到上游区减水效果的 3 倍; 陡坡区域植被减水效果大于缓坡区域。

(2) 植被减水效果与植被郁闭度关系密切。在本文的研究条件下, 植被的减水效果和郁闭度之间呈正相关关系, 郁闭度越大, 减水效果越明显, 30% 郁闭度条件下的减水效果相当于 10%、20% 条件下郁闭度减水效果的 3 倍和 1.4 倍。

(3) 植被可以显著延滞径流洪峰, 植被分布、郁闭度是关键影响因素。研究表明, 延滞作用在水流集中的区域更明显; 同时, 陡坡区域植被的延滞作用大于缓坡区域; 且随着植被郁闭度的增大, 植被的延滞作用也随之增强。

上述结论表明, 进行土地利用方式优化时, 在小流域中坡度较陡区域、水流集中区域或中下游区域种植高郁闭度植被, 能得到更好的水土保持效果。

参考文献:

- [1] 李岩, 王立群. 小流域综合治理及其效益评价研究进展[J]. 北京林业大学学报: 社会科学版, 2008, 7(3): 62-66. (LI Yan, WANG Liqun. Research progress of comprehensive management in small watershed and its benefit evaluation [J]. Journal of Beijing Forestry University: Social Sciences, 2008, 7(3): 62-66. (in Chinese))
- [2] 游珍, 李占斌. 坡面植被对径流的减流减沙作用机理及试验研究[J]. 泥沙研究, 2011(3): 59-62. (YOU Zhen, LI Zhanbin. Study on the effect of vegetation patterns on runoff and sediment production filed in slope [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2011(3): 59-62. (in Chinese))
- [3] 刘窑军, 王天魏, 蔡崇法, 等. 植被措施与路面汇水对三峡库区土质道路边坡侵蚀影响[J]. 水科学进展, 2014, 25(1): 98-105. (LIU Yaojun, WANG Tianwei, CAI Chongfa, et al. Impacts of vegetation and pavement runoff concentration on rural roadside slope erosions in Three Gorge Reservoir area [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(1): 98-105. (in Chinese))
- [4] 高光耀, 傅伯杰, 吕一河, 等. 干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展[J]. 生态学报, 2013(1): 12-22. (GAO Guangyao, FU Bojie, LYU Yihe, et al. The effect of land cover pattern on hillslope soil and water loss in the arid and semi-arid region: A review [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013(1): 12-22. (in Chinese))
- [5] FU B J, CHEN L. Agricultural landscape spatial pattern analysis in the semi-arid hill area of the Loess Plateau, China [J]. Journal of Arid Environments, 2000, 44(3): 291-303.
- [6] ZHENG M G, CAI Q G, CHEN H. Effect of vegetation on runoff-sediment yield relationship at different spatial scales in hilly areas of the Loess Plateau, North China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(9): 3572-3581.
- [7] 史晓亮, 杨志勇, 严登华, 等. 滦河流域土地利用/覆被变化的水文响应[J]. 水科学进展, 2014, 25(1): 21-27. (SHI Xiaoliang, YANG Zhiyong, YAN Denghua, et al. On hydrological response to land-use/cover change in Luanhe River basin [J]. Advances in Water Science, 2014, 25(1): 21-27. (in Chinese))
- [8] 贾媛媛, 郑粉莉, 杨勤科. 黄土高原小流域分布式水蚀预报模型[J]. 水利学报, 2005, 36(3): 328-332. (JIA Yuanyuan, ZHENG Fengli, YANG Qinke. Distributed water erosion prediction model for small watershed in loess plateau [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(3): 328-332. (in Chinese))
- [9] 李文杰, 王兴奎, 李丹勋, 等. 基于物理过程的分布式流域水沙预报模型[J]. 水利学报, 2012, 43(3): 264-274. (LI Wenjie, WANG Xingkui, LI Danxun, et al. A physically-based distributed watershed water erosion prediction model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(3): 264-274. (in Chinese))
- [10] 曹文洪, 祁伟, 郭庆超, 等. 小流域产汇流分布式模型[J]. 水利学报, 2003, 34(9): 48-54. (CAO Wenhong, QI Wei, GUO Qingchao, et al. Distributed model for simulating runoff yield in small watershed [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(9): 48-54. (in Chinese))
- [11] 祁伟, 曹文洪, 郭庆超, 等. 小流域侵蚀产沙分布式数学模型的研究[J], 中国水土保持科学, 2004, 2(1): 13-18. (QI Wei, CAO Wenhong, GUO Qingchao, et al. Study on a distributed model for soil erosion and sediment yield in small watersheds [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2004, 2(1): 13-18. (in Chinese))
- [12] LIU Q Q, CHEN L, LI J C, et al. Two-dimensional kinematic wave model of overland-flow [J]. Journal of Hydrology, 2004, 291(1/2): 28-41.
- [13] LIU Q Q, AN Y. Hydraulic modeling of runoff yield in small watershed [C]//Proceeding of the XXII ICTAM. Adelaide: CD-ROM Proceedings ISBN 978-0-9805142-1-6, 2008: 25-29.
- [14] 杨立文, 李昌哲, 张理宏. 林冠对降雨截留过程的研究[J]. 河北林学院学报, 1995, 10(1): 7-12. (YANG Liwen, LI Changzhe, ZHANG Lihong. A study on interception process of rainfall by forest canopy [J]. Journal of Hebei Forestry College, 1995, 10(1): 7-12. (in Chinese))
- [15] 张洪江, 北原曜, 解明曙, 等. 晋西几种不同土地利用状况下糙率系数的研究[J]. 北京林业大学学报, 1994, 16(4): 86-92. (ZHANG Hongjiang, BEI Yuanyao, JIE Mingshu, et al. Study on roughness coefficient under the conditions of several land utilization in the west of Shanxi province [J]. Journal of Beijing Forestry University, 1994, 16(4): 86-92. (in Chinese))

Effects of the distribution of vegetation on small catchment runoff during rainstorm events *

LI Yanmin, AN Yi, LIU Qingquan

(Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The distribution of vegetation in small catchments is an essential factor determining the generation of runoff during rainstorm events. Using a novel two-dimensional dynamic runoff model, we studied the influence of the distribution of vegetation on rainstorm runoff. First, a kinematic hydrological model of rainstorm events in small watersheds was developed based on a two-dimensional overland flow model. It included canopy interception, surface infiltration, overland flow, and gully flow processes. Data from three rainstorm events in the Heicaohu catchment were then used to verify the model, and good agreement was found. Last, the model was used to examine how the distribution of vegetation and the canopy density affected the runoff process. Model results showed that: First, the vegetation significantly reduces flood discharge and postpones the flood peak, depending on the location and crown density of the vegetation. Second, the efficiency of runoff reduction is substantially higher in downstream and steeply sloped areas (vs. upstream and gently sloping areas), and the degree of crown closure enhances this effect. In fact, in this study, the efficiency of runoff reduction was three times higher in downstream compared with upstream areas, and 30% crown closure resulted in 1.4 times higher efficiency than 20% closure and three times higher than 10% closure.

Key words: small catchment; runoff; kinematic model; vegetation distribution; crown closure; runoff reduction efficiency

论文优先数字出版说明

为即时确认作者科研成果、彰显论文传播利用价值,从2011年1月起,将于《水科学进展》印刷版期刊出版的定稿论文优先在“中国知网”(http://www.cnki.net)以数字出版方式提前出版(优先数字出版)。欢迎读者在中国知网“中国学术期刊网络出版总库”检索、引用本刊作者最新研究成果。

《水科学进展》编辑部

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 11202216; No. 11432015).