

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2019.06.007

那曲流域草地覆盖变化对降雨产流过程的影响

严登明^{1,2}, 翁白莎², 宋新山¹, 马骏³, 杨裕恒², 严登华²

(1. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620; 2. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038;
3. 河北工程大学水利水电学院, 河北 邯郸 056000)

摘要: 为了研究那曲流域草地覆盖变化对产汇流过程的影响, 采用室内人工降雨模拟试验结合数据分析的方法, 通过设置坡度和雨强等不同情景, 研究草地覆盖度变化下地表径流和壤中流的变化规律。结果表明: 随着草地覆盖度的增大, 地表径流和壤中流开始产流的时间渐渐延长, 草地覆盖度每增20%, 地表径流和壤中流开始产流时间分别延长19.86%和13.36%; 随着草地覆盖度增大, 对应地表径流累积产流量减少, 壤中流累积产流量增加, 草地覆盖度每增加20%, 地表径流累积产流量减少4.69%, 壤中流累积量增加6.66%; 雨强、坡度以及草地覆盖度都是影响径流开始时间和径流量的主要因素, 但雨强对产流影响的贡献值最大, 坡度次之、草地覆盖度最小。

关键词: 草地覆盖度; 地表径流; 壤中流; 产流机制; 那曲流域

中图分类号: P334⁺.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-6933(2019)06-0044-08

Effect of grassland cover change on rainfall and runoff yield in Naqu Watershed // YAN Dengming^{1,2}, WENG Baisha², SONG Xinshan¹, MA Jun³, YANG Yuheng², YAN Denghua² (1. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056000, China)

Abstract: In order to study the effect of grassland cover change on runoff yield and confluence process in Naqu Watershed, indoor artificial rainfall simulation experiment combined with data analysis method was used to study the change rule of surface runoff and interflow under grassland cover change by setting different scenarios such as slope and rainfall intensity. The results showed that with the increase of grassland coverage, the runoff generation time of surface runoff and interflow delayed gradually. The runoff generation time of surface runoff and interflow delayed by 19.86% and 13.36% respectively with the increase of grassland coverage by 20%. However, with the increase of grassland coverage, the cumulative amount of surface runoff decreases, and the interflow accumulation increases. For every 20% increase of grassland coverage, the cumulative amount of surface runoff decreases by 4.69%, and the cumulative amount of the interflow increases by 6.66%. Rainfall intensity, slope and grassland coverage are the main factors affecting runoff start time and runoff, but the contribution of rainfall intensity to runoff is the largest, followed by slope and grassland coverage.

Key words: grassland coverage; surface runoff; interflow; runoff generation mechanism; Naqu Watershed

在全球气候变暖的背景下, 极端水文事件发生的风险明显加大, 特别是干旱和洪涝等极端水文事件严重影响了水循环演变过程^[1-6]。降雨产流是水循环演变的主要组成部分, 分析降雨产流的控制因素是研究流域对降雨产流响应的关键。当前研究集中于高寒地区水文循环过程, 如对降水、气温、地温、土壤水分与径流的响应关系的探讨。李太兵等^[7]

认为多年冻土区的降水大多冻结在土壤中, 用于补充土壤水分不足, 而不直接产生径流。土壤水分对降水的响应明显存在较长的滞后现象, 较高的植被覆盖度在一定程度上促进降水入渗^[8]。一些相关的研究对高寒地区生态系统的水文循环和生态过程特点做了系统的阐述^[9-10], 对高寒地区那曲三水转换机理和水资源调控的研究表明了那曲流域水循环

基金项目: 国家自然科学基金(91547209)

作者简介: 严登明(1989—), 男, 博士研究生, 研究方向为水文与水资源。E-mail: 18519500795@163.com

通信作者: 严登华, 教授。E-mail: yandh@iwhr.com

的变化会对高原生态环境产生重大影响^[11-12]。

草地是陆生生态的主要构成要素之一,是大气、水分和土壤的重要联结纽带,同时也是影响区域产汇流的关键因素。研究表明,坡地的主要产流方式非地表径流,而是以壤中流为主^[13-14],即使降水较多的区域其地表径流的产流量也存在空间异质性^[15]。植被冠层截留、植被蒸散发能够引起区域水分变化,植被根系能够改变土壤结构、改善土壤透水性进而影响壤中流的变化^[16-17]。因此,区域植被变化能够直接或间接引起近地表的蒸散发、截留、填洼、下渗等水文要素的变化,从而导致区域产汇流的变化。同时,植被还能够改变地表糙率等坡面流体力学特性、拦截地表蓄水量、改变坡面产汇流路径等,从而提高地表土壤的抗蚀性和抗冲性^[18-21]。通常,植被覆盖度相对较低的地区,其坡面产流量与产流系数均大于植被覆盖度相对较高的地区,因而,高寒地区的植被在拦蓄降水、增加入渗、减少产流、控制土壤侵蚀等方面均有显著的效果^[22-23]。

目前,对高寒地区坡面产流的研究主要集中于冰雪冻土的冻融过程,而在植被影响坡面产流过程方面还缺乏系统的研究。由于高寒地区水循环系统的特殊性,关于高寒地区草地演变影响的各种降水截留、产汇流和蒸散发等生态水循环过程的研究尚不完善,因此,开展此方面的研究有利于清楚认识高寒地区草地演变对坡面产流过程的影响机制,为坡面产流调控提供理论依据。

1 研究区概况

那曲流域是典型的高寒区域,地处青藏高原上西藏自治区北部的藏北高原,流域地理坐标为东经 91°8′~92°1′、北纬 30°48′~32°44′,流域面积约 16 967.4 km²,属于高原亚寒带季风半湿润气候。流域具有太阳辐射强、平均气温低、日温差大、空气稀薄干燥等特点。

2 试验方法

2.1 试验装置与材料

试验采用 10 个自行设计的土槽(长 200 cm、宽 50 cm、高 40 cm)模拟降雨产流过程。土槽可以自由调节坡度,用于模拟地表坡度。同时在槽内安装高度为 10 cm 的薄铁片,防止雨滴溅入槽内和水土流失。试验装置见图 1。为了观察降水过程中的地表径流和壤中流,在土槽出口的纵断面上用铁百叶窗包裹,在百叶窗内铺设一层纱网,防止降水过程中土壤渗漏。在土槽的上端和底部安装导流装置,观察表层和土壤中的产流过程。

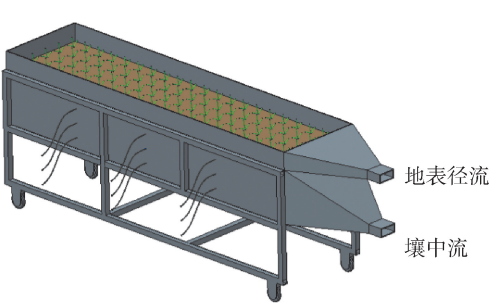


图 1 试验装置

为了模拟那曲流域土壤植被条件,试验土壤从那曲流域采集,采集深度范围为 0~40 cm。采用原状土回填的方式进行室内试验,土壤填装后,在表层以不同行距种入那曲流域草种——披碱草,浇水使草种发芽。在草生长 1~2 个月后用方格法测定草地覆盖度,草地覆盖度范围控制在 0%~80% 之间。一切准备就绪后,在中国水利水电科学研究院延庆实验基地的降雨大厅开展室内人工降雨模拟实验。

2.2 试验方案

设置不同坡度和雨强等情景进行降雨试验。坡度通过土槽的液压装置进行调节,共设置 3 个坡度(1°、5°、10°)。根据那曲流域当地的降雨特征设置相应的降雨强度,在降雨大厅中,通过降雨系统设定两个降雨强度:0.5 mm/min 和 1 mm/min。试验设计情景见表 1。

表 1 不同设计情景

情景	雨强/(mm·min ⁻¹)	坡度/(°)
1	0.5	1
2	0.5	5
3	0.5	10
4	1	1
5	1	5
6	1	10

2.3 径流量测定

试验全程监测降雨、径流形成以及对应产流过程,记录地表径流、壤中流开始产流的时间。从土槽装置开始产流起,每隔 5 min 对径流量进行一次采样,待产流趋于稳定后,停止降雨。其退水过程的径流样每隔 10 min 采集一次。

3 试验结果与分析

3.1 草地覆盖度对地表径流的影响

3.1.1 地表径流开始产流时间

不同草地覆盖度下地表径流开始产流时间见图 2。总体上看,在不同情景下,随着草地覆盖度的增加,开始产流的时间渐渐延长。雨强为 0.5 mm/min 和 1 mm/min 时,草地覆盖度每增加 20%,开始产流时间各延长 16.51% 和 23.19%。当草地覆盖度大于 60% 时,各情景下的草地覆盖度对开始产流时间

不再有明显影响。随着坡度的增加,开始产流时间呈加快趋势。相比情景1,情景2和情景3地表径流开始产流时间分别加快47.04%和62%;相比情景4,情景5和情景6开始产流时间分别加快48.42%和66.73%。

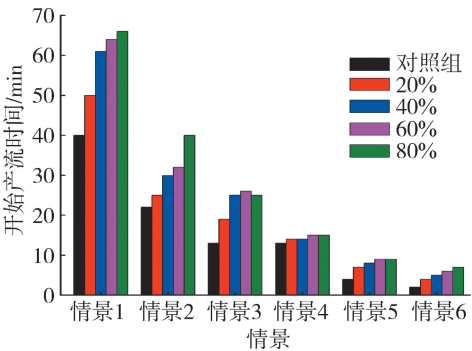


图2 不同草地覆盖度下地表径流开始产流时间

3.1.2 地表径流过程

不同草地覆盖度下地表径流特征见图3,地表径流整体上呈现出“快速增长—趋于平稳”的态势。

在情景1~3中,地表径流达到稳定产流速率的时间随着草地覆盖度的增加而延长,分别在降雨80 min、60 min 和60 min 后达到稳定速率,其中,裸地最早达到稳定速率,草地覆盖度为80%呈现出的最低地表径流速率分别为0.35 mm/min、0.39 mm/min 和0.36 mm/min。随着坡度的增加,不同草地覆盖下地表径流平均速率呈现出增加的趋势,坡度为1°、5°和10°下地表径流平均速率分别为0.25 mm/min、0.29 mm/min 和0.33 mm/min。

不同草地覆盖度下地表径流累积产流量见图4。整体上看,地表径流累积产流量随着草地覆盖度增加而减少。从情景1到情景3,草地覆盖度每增加20%,地表径流累积产流量分别平均减少6.42%、3.66%和3.86%。随着坡度的增加,不同草地覆盖度下地表径流累积产流量呈现增大趋势。坡度为1°、5°和10°时,不同草地盖度下累积径流总量分别为118.66 mm、142.31 mm 和144.90 mm。

在情景4~6中,地表径流达到稳定产流速率

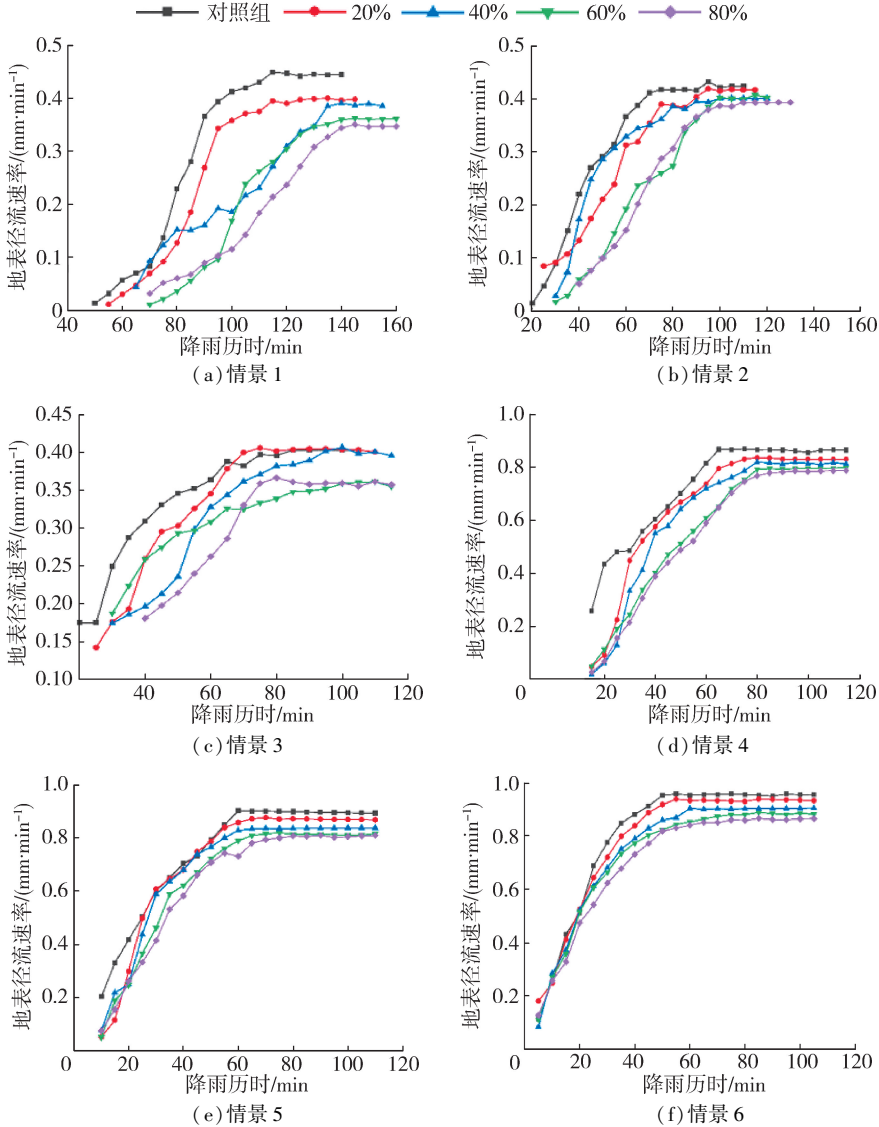


图3 不同草地覆盖度下地表径流速率

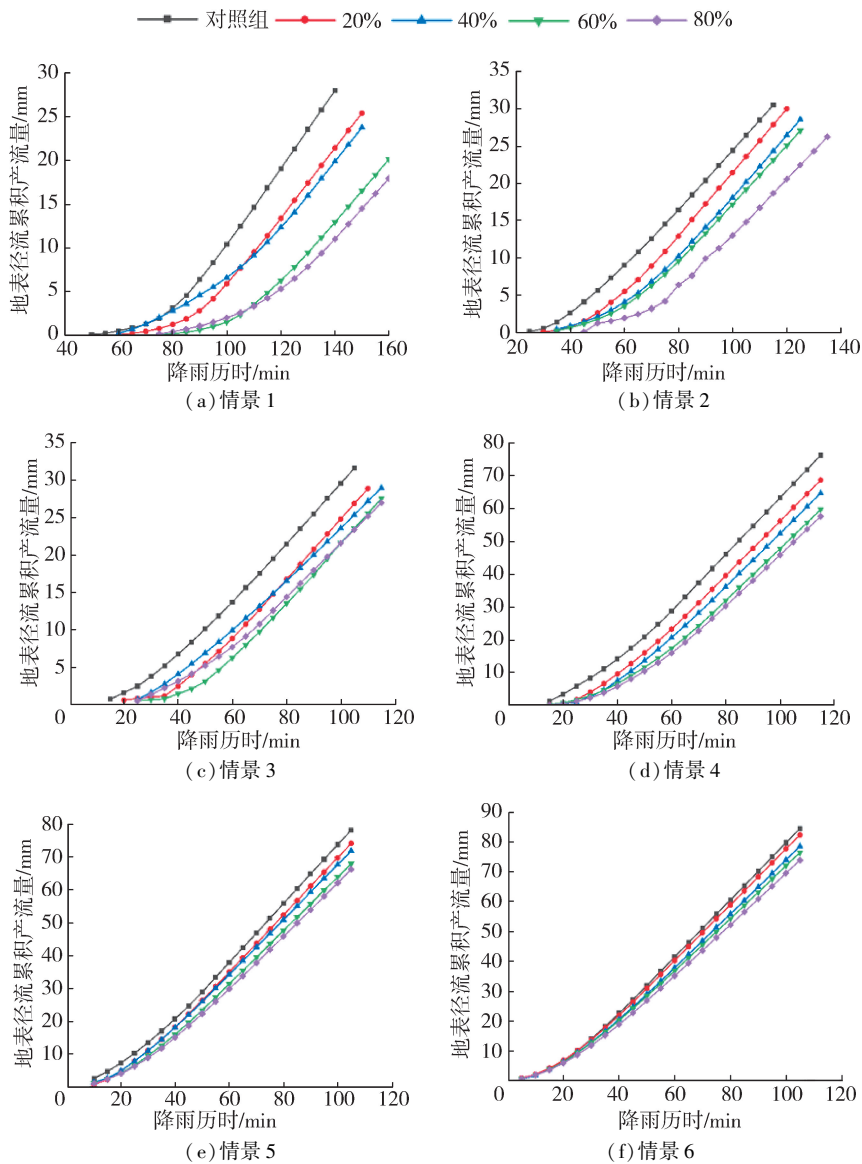


图4 不同草地覆盖度下地表径流累积产流量

的时间随着草地覆盖度的增加而延长,分别在降雨 60 min、60 min 和 50 min 后达到稳定速率。其中,裸地最早达到稳定速率,草地覆盖度为 80% 呈现出的最低地表径流速率分别为 0.79 mm/min、0.81 mm/min 和 0.87 mm/min。随着坡度的增加,不同草地覆盖度下地表径流平均速率呈现出增加的趋势,坡度为 1°、5° 和 10° 下地表径流平均速率分别为 0.82 mm/min、0.85 mm/min 和 0.91 mm/min。

整体上看,情景 4、情景 5 和情景 6 的地表径流累积产流量随着草地覆盖度增加而减少。从情景 4 到情景 6,草地覆盖度每增加 20%,地表径流累积量分别平均减小 6.71%、4.15% 和 3.30%。随着坡度的增加,不同草地覆盖度下累积径流总量呈现增加趋势。坡度为 1°、5° 和 10° 时,不同草地覆盖度下地表径流累积量分别为 326.89 mm、358.56 mm 和 395.63 mm。

3.2 草地覆盖度对壤中流的影响

3.2.1 壤中流开始产流时间

降雨过程中,一部分降水通过地表径流流走,另一部分随着下渗进入土壤后产生壤中流。不同情景下壤中流开始产流时间见图 5,总体上看,壤中流开始产流时间随着草地覆盖度的增加而增加。雨强为 0.5 mm/min 和 1 mm/min 时,草地覆盖度每增加

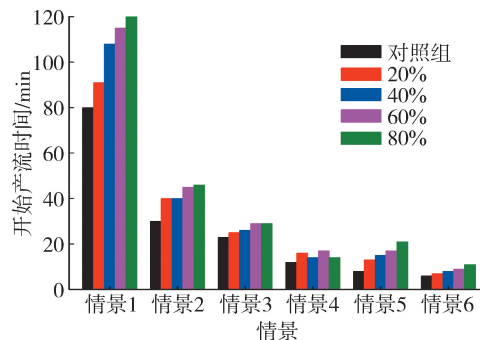


图5 不同草地覆盖度不同情景下壤中流开始产流时间

20%,开始产流时间分别增加 9.63% 和 17.08%。在不同草地覆盖度下,壤中流开始产流时间随着坡度的增加而减少。随着坡度的增加,开始产流时间呈减少趋势。相比情景 1,情景 2 和情景 3 壤中流开始产流时间分别减少 60.8% 和 74.06%;相比情景 4,情景 5 和情景 6 壤中流开始产流时间减少的并不明显。

3.2.2 对壤中流过程的影响

不同草地覆盖度下壤中流特征如图 6 所示,壤中流整体上呈现出“缓慢增长—趋于平稳”的态势。从情景 1 到情景 3 中,壤中流达到稳定产流速率的时间随着草地覆盖度的增加而延长。其中,裸地呈现最低稳定速率,草地覆盖度为 80% 呈现出最高壤中流速率分别为 0.274 mm/min、0.275 mm/min 和 0.284 mm/min。随着坡度的增大,不同草地覆盖度下壤中流平均速率呈现出增大的趋势,坡度为 1°、

5°和 10°下壤中流平均速率分别为 0.152 mm/min、0.154 mm/min 和 0.157 mm/min。

不同草地覆盖度下地表径流累积产流量见图 7,整体上看,壤中流累积产流量随着草地覆盖度增加而增大。从情景 1 到情景 3,草地覆盖度每增加 20%,壤中流累积产流量分别平均增加 6.55%、8.28% 和 7.27%。随着坡度的增大,不同草地覆盖度下壤中流累积产流量呈减小趋势。坡度为 1°、5°和 10°时,不同草地覆盖度下壤中流累积产流量分别为 113.85 mm、109.03 mm 和 93.30 mm。

从情景 4 到情景 6 中,壤中流达到稳定产流速率的时间随着草地覆盖度的增加而延长。其中,裸地最早达到稳定速率,草地覆盖度为 80% 呈现出稳定壤中流速率分别为 0.341 mm/min、0.384 mm/min 和 0.357 mm/min。随着坡度的增加,不同草地覆盖度下地表径流平均速率呈现出增加的趋势,坡度为

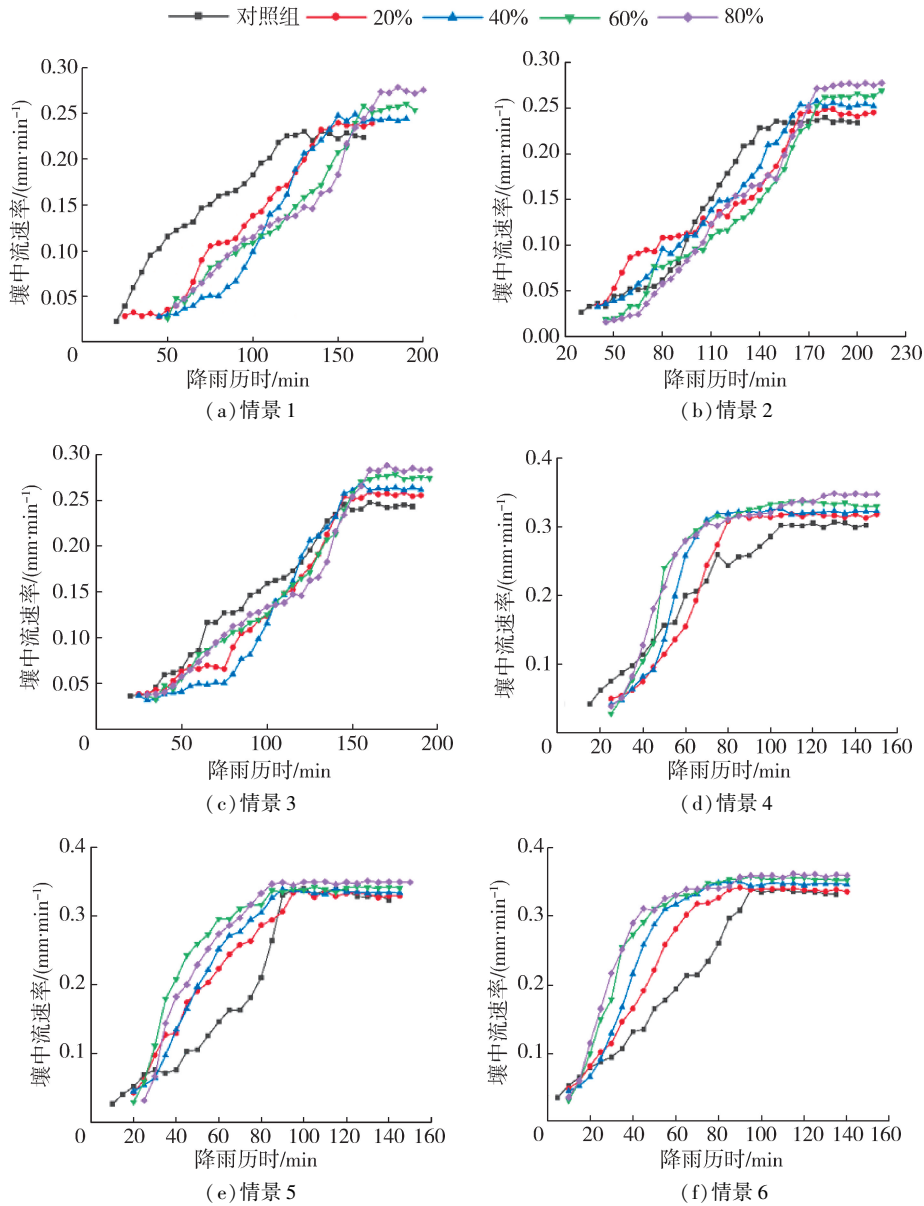


图 6 不同草地覆盖度下壤中流速率

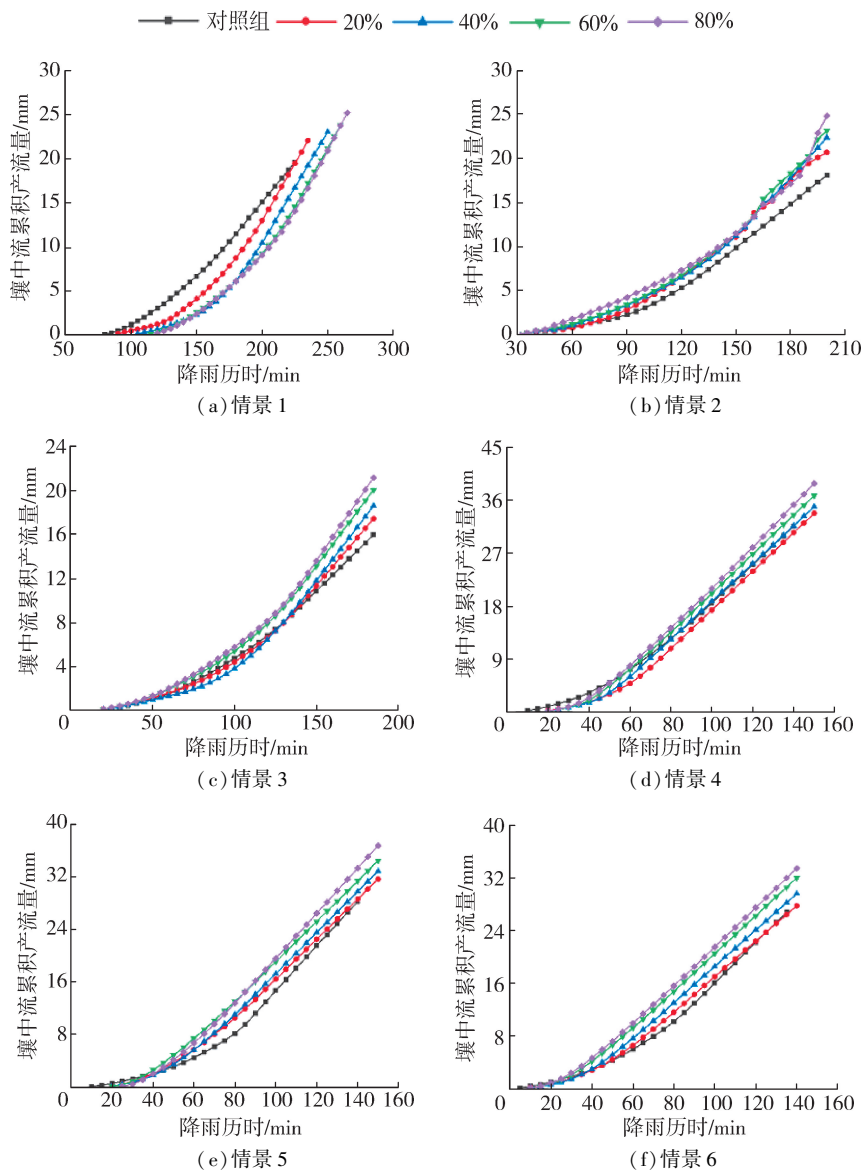


图7 不同草地覆盖度下壤中流累积产流量

1°、5°和10°下地表径流平均速率分别为0.249 mm/min、0.256 mm/min 和0.267 mm/min。

整体上看,情景4、情景5和情景6的壤中流累积产流量随着草地覆盖度增加而增加。从情景4到情景6,草地覆盖度每增加20%,壤中流累积产流量分别平均增加5.30%、6.84%和5.74%。随着坡度的增加,不同草地覆盖度下壤中流累积产流量呈减少趋势。坡度为1°、5°和10°时,不同草地覆盖度下壤中流累积产流量分别为179.94 mm、163.70 mm和149.53 mm。

3.3 产流量影响因素分析

一般采用生产函数描述生产过程中投入的生产要素与最大输出之间可能存在的依赖关系。柯布-道格拉斯生产函数(Cobb-Douglas Function, C-D生产函数)通过引入技术资源因素对生产函数一般形式进行改进,主要用来预测国家或者地区的工业系统或大企业的生产,是分析发展生产途径的一种经

济数学函数模型。C-D生产函数模型也被应用于水文学领域,用于拟合水文参数之间的关系。本文采用该模型模拟径流与影响因子之间的函数关系,其中各因素的指数的正负表示该因子与产流呈正相关或者负相关关系,其指数的绝对值表示各因素对产流贡献的大小。通过模型模拟出地表径流和壤中流与影响因子的函数关系式分别为

$$Q_1 = 0.471I^{1.412}S^{0.232}V^{-0.085} \quad (r^2 = 0.842) \quad (1)$$

$$Q_2 = 0.586I^{1.473}S^{-0.187}V^{0.076} \quad (r^2 = 0.878) \quad (2)$$

式中: Q_1 为地表径流量; Q_2 为壤中流流量; I 为降雨强度; S 为坡度; V 为草地覆盖度。

3.3.1 影响地表产流的因素

从式(1)可以看出,雨强、坡度与地表产流呈正相关关系,草地覆盖度与地表产流呈负相关关系。从贡献值来看,雨强最大,坡度次之,草地覆盖度最小。雨强是影响产流量的最主要因素,雨强越大,能快速形成产流。坡度越大,地表产流的侧向运移

速率会加快,从而增加产流^[24-26]。草地覆盖面积越大,其对坡面流的延滞作用越显著,地表产流量越少。草地覆盖度与土壤入渗、地表产流机制有着明显的相关性,是影响地表产流的重要因素。研究表明,草地覆盖可以使雨滴降落能量有效降低,并使降雨再分配,增加土壤入渗并减少地表产流^[27-29]。

3.3.2 影响壤中流产流的因素

从式(2)可以看出,雨强、草地覆盖度与壤中流呈正相关关系,坡度与壤中流呈现负相关关系。从贡献值来看,仍是雨强最大,坡度次之,草地覆盖度最小。随着草地覆盖度的增加,根系密度变大,为壤中流的发育提供了有利条件,故草地覆盖度越大,壤中流越大。坡度的增大,导致地表产流增加,下渗到土壤中的降水减少,从而壤中流减少。草地覆盖度也是影响壤中流的一个重要因素。通过草地根系可改变土壤中的径流通道,从而影响壤中流的产流量。

4 结 论

a. 不同降雨情景下,地表径流和壤中流开始产流的时间均随草地覆盖度的增加而增加。

b. 随着草地覆盖度的增加,对应地表径流累积量减小,壤中流累积产流量增加。

c. 相对于雨强、坡度,草地覆盖度对径流开始时间和径流量的影响偏小。

参考文献:

- [1] 王红瑞,洪思扬,秦道清. 干旱与水资源短缺相关问题探讨[J]. 水资源保护, 2017, 33(5): 5-8. (WANG Hongrui, HONG Siyang, QIN Daoqing. Discussion on related issues of drought and water shortage[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(5): 5-8. (in Chinese))
- [2] 荣艳淑,魏佳,陈虎,等. 长江流域径流对气候变化响应的定量分析[J]. 水资源保护, 2015, 31(6): 40-44. (RONG Yanshu, WEI Jia, CHEN Hu, et al. Quantitative analysis on the response of runoff to climate change in Yangtze River Basin [J], Water Resources Protection, 2015, 31(6): 40-44. (in Chinese))
- [3] 夏军,石卫,王强,等. 海绵城市建设中若干水文学问题的研讨[J]. 水资源保护, 2017, 33(1): 1-8. (XIA Jun, SHI Wei, WANG Qiang, et al. Discussion of several hydrological issues regarding sponge city construction[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(1): 1-8. (in Chinese))
- [4] 曹永强,袁立婷,王飞龙. 基于文献计量学的洪涝灾害研究现状及发展趋势分析[J]. 水利经济, 2018, 36(4): 33-39. (CAO Yongqiang, YUAN Liting, WANG Feilong. Current research situation and development trend of flood and waterlogging disasters based on bibliometrics [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36

(4): 33-39. (in Chinese))

- [5] 张鑫,王嘉鑫,王全蓉. 洪水灾害的风险特征及保险制度设计[J]. 水利经济, 2018, 36(5): 57-60. (ZHANG Xin, WANG Jiaxin, WANG Quanrong. Risk characteristics of flood disasters and design of insurance system [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36(5): 57-60. (in Chinese))
- [6] 华坚,刘秀,李晶晶. 河南省水利工程系统与“经济-社会-水域生态”复合系统的协调度评价[J]. 水利经济, 2018, 36(5): 1-6. (HUA Jian, LIU Xiu, LI Jingjing. Evaluation of coordination degree of water conservancy project system and “economy-social-water ecology” complex system in Henan Province [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36(5): 1-6. (in Chinese))
- [7] 李太兵,王根绪,胡宏昌,等. 长江源多年冻土区典型小流域水文过程特征研究[J]. 冰川冻土, 2009, 31(1): 82-88. (LI Taibing, WANG Genxu, HU Hongchang, et al. Hydrological process in a typical small permafrost watershed at the headwaters of yangtze river[J], Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(1): 82-88. (in Chinese))
- [8] 柴雯,王根绪,李元寿,等. 长江源区不同植被覆盖下土壤水分对降水的响应[J]. 冰川冻土, 2008, 30(2): 329-337. (CHAI Wen, WANG Genxu, LI Yuanshou, et al. Response of soil moisture under different vegetation coverage to precipitation in the headwaters of the yangtze river[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(2): 329-337. (in Chinese))
- [9] 李春杰,任东兴,王根绪,等. 青藏高原两种草甸类型人工降雨截留特征分析[J]. 水科学进展, 2009, 20(6): 769-774. (LI Chunjie, REN Dongxing, WANG Genxu, et al. Analysis of artificial precipitation interception over two meadow species on Qinghai-Tibet Plateau [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(6): 769-774. (in Chinese))
- [10] 褚俊英,王浩,王建华,等. 我国生活水循环系统的分析与调控策略[J]. 水利学报, 2009, 40(5): 614-622. (CHU Junying, WANG Hao, WANG Jianhua, et al. Domestic water cycle system and its regulatory strategies in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(5): 614-622. (in Chinese))
- [11] 陈进. 长江源区水循环机理探讨[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(4): 1-5. (CHEN Jin. Water cycle mechanism in the source region of Yangtze River [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(4): 1-5. (in Chinese))
- [12] 何霄嘉,王国庆,鲍振鑫. 气候、植被变化与水文循环响应研究进展及展望[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(2): 1-5. (HE Xiaojia, WANG Guoqing, BAO Zhenxin. Progress and prospective of climate and vegetation coverage change as well as responses of hydrological cycle [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2016, 27(2): 1-5. (in Chinese))

- [13] 肖雄,吴华武,李小雁. 壤中流研究进展与展望[J]. 干旱气象, 2016, 34(3): 391-402. (XIAO Xiong, WU Huawu, LI Xiaoyan. Research progress and prospects of subsurface flow[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(3): 391-402. (in Chinese))
- [14] DE SCHEPPER G, THERRIEN R, REFSGAARD J C, et al. Simulating coupled surface and subsurface water flow in a tile-drained agricultural catchment [J]. Journal of Hydrology, 2015, 521: 374-388.
- [15] 杨帆,姚文艺,戴文鸿,等. 植被影响下的坡面水力侵蚀研究进展[J]. 人民黄河, 2013, 35(1): 72-74. (YANG Fan, YAO Wenyi, DAI Wenhong, et al. Progress of the water erosion study on the vegetation slope[J]. Yellow River, 2013, 35(1): 72-74. (in Chinese))
- [16] 车伍,鲍仁强,赵杨,等. 中美海绵城市建设中的树木管理比较[J]. 水资源保护, 2019, 35(3): 7-13. (CHE Wu, BAO Renqiang, ZHAO Yang, et al. Comparison of tree management in sponge city construction between China and America [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(3): 7-13. (in Chinese))
- [17] 徐宗学,李景玉. 水文科学研究进展的回顾与展望[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 450-459. (XU Zongxue, LI Jingyu. Progress in hydrological sciences: past, present and future[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(4): 450-459. (in Chinese))
- [18] 黄斌斌,郝成元,李若男,等. 气候变化及人类活动对地表径流改变的贡献率及其量化方法研究进展[J]. 自然资源学报, 2018, 33(5): 181-192. (HUANG Binbin, HAO Chengyuan, LI Ruonan, et al. Research progress on the quantitative methods of calculating contribution rates of climate change and human activities to surface runoff changes[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(5): 181-192. (in Chinese))
- [19] 王保一,张荣华,荆莎莎,等. 降雨和坡度对路基边坡产流产沙的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2019, 43(2): 114-120. (WANG Baoyi, ZHANG Ronghua, JING Shasha, et al. Effects of rainfall and slope gradient on runoff and sediment yield of subgrade slope[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2019, 43(2): 114-120. (in Chinese))
- [20] 嵇晓雷,杨平. 基于根系形态的根系固坡作用数值分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2013, 37(2): 113-117. (JI Xiaolei, YANG Ping. Numerical analysis of the effects of roots on the slope reinforcement based on the roots forms [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2013, 37(2): 113-117. (in Chinese))
- [21] 俞正祥,韩广忠,蔡体久,等. 基于 GF-1 遥感数据的大兴安岭林区雪水当量反演[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, 41(3): 105-111. (YU Zhengxiang, HAN Guangzhong, CAI Tiji, et al. Comparison between GF-1 data and Landsat-8 data in inverting SWE of the forest in the northern of Daxing'an Mountain[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2017, 41(03): 105-111. (in Chinese))
- [22] 李勉,姚文艺,李占斌. 黄土高原草本植被水土保持作用研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 74-80. (LI Mian, YAO Wenyi, LI Zhanbin. Progress of the effect of grassland vegetation for conserving soil and water on loess plateau [J]. Advances in Earth Science, 2005, 20(1): 74-80. (in Chinese))
- [23] 赵梦杰,姚文艺,王金花,等. 植被覆盖度对黄土高原地区土壤入渗及产流影响的试验研究[J]. 中国水土保持, 2015(6): 41-43. (ZHAO Mengjie, YAO Wenyi, WANG Jinhua, et al. Experimental study on influence of vegetation coverage to soil infiltration and runoff-producing of the loess plateau region [J]. Soil and Water Conservation in china, 2015(6): 41-43. (in Chinese))
- [24] 吕锡芝,康玲玲,左仲国,等. 黄土高原吕二沟流域不同植被下的坡面径流特征[J]. 生态环境学报, 2015(7): 1113-1117. (LYU Xizhi, KANG Lingling, ZUO Zhongguo, et al. Characteristics of slope runoff under different vegetation conditions in Lvergou watershed of the loess plateau [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015(7): 1113-1117. (in Chinese))
- [25] 刘宏伟,高菲,余钟波,等. 湿润地区坡面土壤含水率时空变异性研究[J]. 水资源保护, 2016, 32(5): 17-23. (LIU Hongwei, GAO Fei, YU Zhongbo, et al. Study on temporal-spatial variability of soil moisture content on hillslope in a humid area [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(5): 17-23. (in Chinese))
- [26] 余冬立,唐胜强,房凯,等. 海涂围垦区盐碱粉壤土坡面径流剥蚀过程影响试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(4): 290-295. (SHE Dongli, TANG Shengqiang, FANG Kai, et al. Study on the soil detachment process for saline-alkali silty loam slopes in a coastal reclamation area [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(4): 290-295. (in Chinese))
- [27] 吕乐婷,张杰,江源,等. 土地利用变化对东江流域产流过程影响的定量评估[J]. 水资源保护, 2018, 34(3): 45-51. (LYU Leting, ZHANG Jie, JIANG Yuan, et al. Quantitative assessment on influence of land use change on process of runoff production in Dongjiang River Basin [J]. Water Resources Protection, 2018, 34(3): 45-51. (in Chinese))
- [28] 朱冰冰,李占斌,李鹏,等. 草本植被覆盖对坡面降雨径流侵蚀影响的试验研究[J]. 土壤学报, 2010, 47(3): 401-407. (ZHU Bingbing, LI Zhanbin, LI Peng. Effect of grass coverage on sediment yield of rain on slope [J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(3): 401-407. (in Chinese))
- [29] 李毅,邵明安. 人工草地覆盖条件下降雨入渗影响因素的实验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 18-23. (LI Yi, SHAO Mingan. Experimental study on influence factors of rainfall and infiltration under artificial grassland coverage [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(3): 18-23. (in Chinese))

(收稿日期:2019-07-13 编辑:彭桃英)