

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.03.038.

陈泽勋, 吴英杰, 王文君, 等. 不同放牧条件下坡面初始产流时间和径流流速变化特征[J]. 水土保持研究, 2023, 30(3): 62-68.

CHEN Zexun, WU Yingjie, WANG Wenjun, et al. Characteristics of Initial Yield Time and Velocity of Runoff Under Different Grazing Conditions [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(3): 62-68.

不同放牧条件下坡面初始产流时间和 径流流速变化特征

陈泽勋, 吴英杰, 王文君, 李 玮, 赵水霞, 刘铁军

(水利部 牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020)

摘 要: [目的] 研究不同降雨强度下植被覆盖度和坡度对我国北方典型草地坡面产流的影响, 以期进一步丰富我国有关北方典型干旱半干旱草原的水土保持研究理论, 为合理配置草原资源提供理论及实际参考依据。[方法] 研究基于野外人工模拟降雨试验的方法, 分析了不同雨强下初始产流时间与植被盖度和坡度的相关规律, 以及不同放牧条件下坡面径流流速的变化规律, 建立了初始产流时间与植被盖度和坡度以及坡面流速与植被盖度和坡度的多元回归模型。[结果] 雨强为 1.5 mm/min 时, 3 个坡度 4°, 9°, 14° 坡面的初始产流时间相比裸地, 放牧条件下分别增加了 1.23, 1.39, 1.30 倍, 围封条件下分别增加了 2.02, 2.03, 1.38 倍。整个模拟降雨的坡面径流流速变化范围 0.05~0.3 m/s, 围封状态下, 坡面流速仅是放牧条件下的 63%~68%。[结论] 植被盖度和坡度对初始产流时间的影响较为显著, 在其他条件相同的情况下, 初始产流时间随着雨强或坡度的增大均减短, 随着植被盖度的增加而明显延长。在其他条件相同的情况下, 雨强或坡度越大, 坡面流速越大; 植被盖度越大, 坡面流速越小, 产流总量与之规律相同。

关键词: 植被盖度; 坡度; 初始产流时间; 坡面径流流速; 典型草原

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)03-0062-07

Characteristics of Initial Yield Time and Velocity of Runoff Under Different Grazing Conditions

CHEN Zexun, WU Yingjie, WANG Wenjun, LI Wei, ZHAO Shuixia, LIU Tiejun

(Institute of Water Resources for Pastoral Area, Ministry of Water Resources, Hohhot 010020, China)

Abstract: [Objective] This paper studies the influence of vegetation coverage and slope on slope runoff of typical grassland in northern China under different rainfall intensities in order to further enrich the research theory of soil and water conservation of typical arid and semi-arid grassland in northern China, and to provide theoretical and practical reference for the rational allocation of grassland resources. [Methods] A series of studies on slope runoff yield under different grazing conditions were carried out based on field artificial simulated rainfall experiments. According to the field survey results, different grazing scenarios were simulated by means of manual grass cutting. The pattern of correlation between initial runoff time and vegetation coverage and slope under different rainfall intensities and the pattern of variation of runoff velocity under different grazing conditions were analyzed, and the multiple regression linear equations of initial runoff time, vegetation coverage and slope, as well as the multiple regression linear equations of slope velocity and vegetation coverage and slope were established. [Results] When the rainfall intensity is 1.5 mm/min, the initial runoff generation time of the three slopes 4°, 9° and 14° increased by 1.23 times, 1.39 times and 1.30 times,

收稿日期: 2022-02-07

修回日期: 2022-03-28

资助项目: 内蒙古自治区科技计划项目, (2021GG0020); 中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项项目 (MK2020J11)

第一作者: 陈泽勋 (1995—), 男, 内蒙古赤峰市人, 硕士研究生, 从事水文学及水资源、草原坡面产流产沙过程研究。E-mail: 719182186@qq.com

通信作者: 吴英杰 (1982—), 男, 内蒙古呼伦贝尔市人, 工程师, 主要从事牧区干旱与减灾、生态水文学方面等研究。E-mail: 508188330@qq.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

respectively, compared with that of bare land, under grazing conditions, under the condition of enclosure, it increased by 2.02 times, 2.03 times and 1.38 times, respectively. The variation range of runoff flow velocity of the whole simulated rainfall was between 0.05 and 0.3 m/s, in the enclosed state, the slope velocity was only 63%~68% of that under grazing conditions. [Conclusion] vegetation coverage and slope have the significant impact on the initial runoff time. Under the same other conditions, the initial runoff time decreases with the increase of rainfall intensity or slope, and significantly prolongs with the increase of vegetation coverage. With other conditions being the same, the heavier the rainfall or the steeper the slope is, the higher the slope velocity will be, while the higher the vegetation coverage is, the lower the slope velocity will be, the pattern of total runoff production is the same.

Keywords: vegetation coverage; slope; initial production time; slope runoff velocity; typical grassland

草原是陆地生态系统的主要组成部分,我国草原面积约占国土总面积的 41%^[1],其中 21.1%分布在内蒙古自治区。据联合国环境规划署(UNEP)报告,世界已有 73%的草原出现不同程度的沙漠化与土地退化,我国有 90%的草原已经或正在退化,其中中度以上退化草原占总面积的 1/3^[2],过度放牧及不合理开发利用是导致草原植被矮小且多样性降低^[3]、土壤贫瘠化与干燥化、微生物减少与功能退化^[4]、河谷湿地萎缩与沼泽化、土地沙漠化的主要原因之一,对草原坡面降雨产流产沙过程^[5]的影响极其显著。降雨是坡面发生土壤侵蚀的直接原因,尤其是降雨强度对坡面土壤侵蚀^[6]的作用最显著。现有研究表明,坡面径流量^[7]和侵蚀量^[8]会随着雨强的增大而增加。而植被通过降低雨滴落下的动能^[9],增加土壤入渗,通过植被茎叶对于雨滴的截留作用延缓初始产流时间,并且减少雨水直接击打地表裸露面积造成的土壤侵蚀,从而达到减流减沙的作用^[10-12]。当前我国关于坡面产流试验在黄土高原等土壤侵蚀严重的地区以及林区已有较深入的研究,研究者通过运用人工模拟降雨的方法对影响山区林地坡面初始产流时间的因素进行了一系列的分析^[13];黄土丘陵区植被参数对于初始产流时间的影响^[14];以及不同水土保持调控措施下黄土坡面径流流速的变化特征^[15],但对于干旱半干旱的草原型流域研究较少,且关于典型草原(锡林郭勒草原)覆被变化对降雨产流的影响研究几乎空白,对于野外原状土下人工模拟降雨坡面产流过程研究还很少。本研究基于野外原状土的条件,进行野外人工模拟降雨试验,研究降雨强度、植被覆盖度、坡度对我国北方典型草地坡面产流时间及坡面径流流速的影响,以期丰富我国有关北方典型干旱半干旱草原的水土保持研究理论,为合理配置草原资源提供理论依据。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

本研究选择典型的半干旱草原型内陆河流域—锡林河流域作为研究区(43°24′—44°39′N, 115°25′—117°15′E)。研究区地处于高纬度干旱半干旱地带,春季风沙大、夏季蒸发量大、秋季短暂且降水量小、冬季气温低、昼夜温差大和日照时长等。此外,流域内常发生干旱、霜冻、暴雨、风雪等自然灾害。由锡林浩特市国家气象站多年统计结果可知:研究区内降水多年平均降水量为 289 mm,同时降雨分布极不均匀,在空间尺度上,降水呈现东北多西南少的分布特征,在时间尺度上,全年 7 成以上的降水主要集中在每年的 6—9 月份。流域内年最大降水量 511 mm,最小年降水量 121 mm,此外,年均降雪量为 10 mm。研究区年均气温 2.6℃,每年冬季 11 月份到次年 3 月份气温最低。

1.2 野外径流小区设置

本研究试验开展于 2019 年 5—8 月,野外径流小区位于锡林河流域下游锡林浩特市区东 36 km 处的毛登牧场,流域内植被主要以针茅和羊草为主,主要的土壤类型有栗钙土、黑钙土、风沙土,本研究野外径流小区的主要土壤类型为栗钙土,下垫面条件的代表性较好。通过对该区域放牧程度的调查和考察,选取 3 个具有代表性的植被覆盖度:围封、放牧、过度放牧(裸地),野外模拟径流小区由长 2 m×宽 1 m 的铁皮围成,铁皮埋入土壤 50 cm,防止径流水分侧向入渗,对试验产生不利影响。同时试验设置 4°, 9°, 14°共 3 个坡度,共 9 种组合类型,每种组合类型设置对照小区,共建野外人工模拟径流小区 18 个。

1.3 人工降雨试验装置

模拟降雨装置采用西安森森电子科技有限公司生产的野外便携式人工模拟降雨器 MSR-S20-W1100,降雨方式为下喷式,通过降雨参数(雨强或压力)的预先

设定,对整个降雨过程进行控制。特点一,降雨均匀度 $\geq 85\%$;特点二,通过手持式平板电脑对降雨过程进行操控,大大降低了野外降雨试验的难度;特点三,降雨装置安装便捷且稳定,采用手摇式垂直升降,组装过程只需要2~3人;特点四,经过反复试验率定,降雨器模拟出来的雨滴与自然降雨十分相似,可模拟多种不同环境下的降雨类型,在缩短降雨周期的同时,还可以弥补自然降雨条件下无法得到的结果。

1.4 试验方法设计

本试验采用野外人工模拟降雨的方法,以人工剪草的方式来控制盖度从而模拟天然放牧状态下草场的植被盖度;裸地剪除地面所有植被,只保留根系,放牧小区剪除部分植被茎叶,保留5 cm的茎干,围封小区播撒草籽增加盖度。为确保每次试验时土壤含水量基本保持一致,在正式降雨前通过土壤水分探头测定的结果,将径流小区土壤前期平均含水率控制在

20%左右。同时每次降雨前用塑料布遮挡径流小区,待降雨强度均匀稳定后迅速撤去塑料布再进行试验。考虑到野外风速对试验的影响,在径流小区外围自行制作了滑动式挡风装置。在人工模拟降雨的开始后观察坡面,记录坡面发生产流的时间节点,待产流后继续保持60 min的降雨。产流后每3 min取一个径流水沙样;同时采用染色剂示踪法测取同时段内的坡面流速;先测量试验所收集径流泥沙样品的质量,得到径流的产流量与产沙量总和,随后将样品静置24 h,使泥沙完全沉淀后倒出上层清液,称量清液质量,得到每3 min的产流量。根据研究区内近年降雨和坡面坡度以及相关文献研究,对牧区不同放牧程度的草原进行实地考察,选择降雨强度(0.5 mm/min, 1.0 mm/min, 1.5 mm/min)。在3种坡度及3种雨强下,每种组合类型进行两次试验,同时进行两次重复对照试验,共计36次试验,试验具体组合设计见表1。

表1 野外人工模拟降雨试验设计

编号	植被盖度	坡度/(°)	雨强/ (mm·min ⁻¹)	对照组 编号	植被盖度	坡度/(°)	雨强/ (mm·min ⁻¹)
1	围封、放牧、裸地	4	0.5	10	围封、放牧、裸地	4	0.5
2	围封、放牧、裸地	9	0.5	11	围封、放牧、裸地	9	0.5
3	围封、放牧、裸地	14	0.5	12	围封、放牧、裸地	14	0.5
4	围封、放牧、裸地	4	1.0	13	围封、放牧、裸地	4	1.0
5	围封、放牧、裸地	9	1.0	14	围封、放牧、裸地	9	1.0
6	围封、放牧、裸地	14	1.0	15	围封、放牧、裸地	14	1.0
7	围封、放牧、裸地	4	1.5	16	围封、放牧、裸地	4	1.5
8	围封、放牧、裸地	9	1.5	17	围封、放牧、裸地	9	1.5
9	围封、放牧、裸地	14	1.5	18	围封、放牧、裸地	14	1.5

2 结果与分析

在典型干旱半干旱的草原,流域的地下水位深、包气带厚,降雨过程中下渗的雨水量不容易使整个包气带达到田间持水量,所以本研究不考虑地下径流,当降雨强度大于入渗强度时产生的地表径流,是衡量坡面水土流失的重要指标^[16]。坡面径流侵蚀的发生是由于径流产生的侵蚀力大于土壤抗蚀力,初始产流时间和坡面流速衡量侵蚀产流过程的重要指标^[17-18]。

2.1 不同雨强下植被盖度和坡度对坡面初始产流时间的影响

2.1.1 不同植被盖度下初始产流时间的变化 表2列出了在降雨强度和坡度相同,不同放牧情景下初始产流时间的比较。在雨强为1.0 mm/min,坡面坡度为4°时的初始产流时间,裸地条件(植被盖度0%)下是509 s,放牧条件(植被盖度35%)下是514 s,围封条件(植被盖度66%)下是774 s,两者相比于裸地条件分别增加了5 s和265 s。在雨强相同,坡面坡度

由4在变为9为时的初始产流时间,裸地条件(植被盖度0%)下是427 s,放牧条件(植被盖度35%)下是452 s,围封条件(植被盖度66%)下是733 s,两者相比于裸地条件分别增加了25 s和306 s。当雨强为1.5 mm/min,坡面坡度为4°时的初始产流时间,裸地条件(植被盖度0%)下是295 s,放牧条件(植被盖度35%)下是364 s,围封条件(植被盖度66%)下是596 s,两者相比于裸地条件分别增加了69 s和301 s。在雨强相同,坡面坡度由4°在变为9°为时,3种条件下坡面产流时间均较快,裸地条件与围封条件下初始产流时间相差不大且均不足300 s,但围封条件下产流时间是裸地条件的2.03倍,是放牧条件的1.46倍。综上所述,植被有着延缓产流时间的作用,但围封条件下的高盖度植被相比于放牧条件的低盖度植被,延缓产流时间的作用更加明显。

2.1.2 不同坡度下初始产流时间的变化 表3表示的是在降雨强度为0.5 mm/min, 1.0 mm/min, 1.5 mm/min, 植被盖度分别为0%裸地条件下、35%放牧

条件下和 66% 围封条件下时不同坡度下的初始产流时间表。可以看出初始产流时间随着坡度的增加而减小,在植被盖度相同,雨强为 0.5 mm/min 时,坡面坡度由 4° 增加到 14° 到,初始产流时间分别减小了 47.9%,54.0% 和 74.9%;当雨强为 1.0 mm/min 时,坡面坡度由 4°,增加到 14° 到时,初始产流时间分别减小了 60.0%,23.6% 和 13.0%;当雨强为 1.5 mm/min,坡面坡度由 4° 增加到 14° 到时,初始产流时间分别减小了 130%,117.9% 和 238%。综上所述,当相同的植被盖度以及雨强时,降雨的入渗随着坡面坡度增加而减小,加快了雨滴在坡面的汇聚,导致初始产流时间整体前移。与此同时,在雨强变大后,初始产流时间变化的范围也会随着坡面坡度的增加而变大。

2.1.3 初始产流时间与植被盖度、坡度的关系 图 1 是不同雨强下初始产流时间随植被盖度变化的关系。可以看出,随着植被盖度的增加初始产流时间增加趋势越显著,相同植被盖度下,坡度越大,初始产流时间越小。

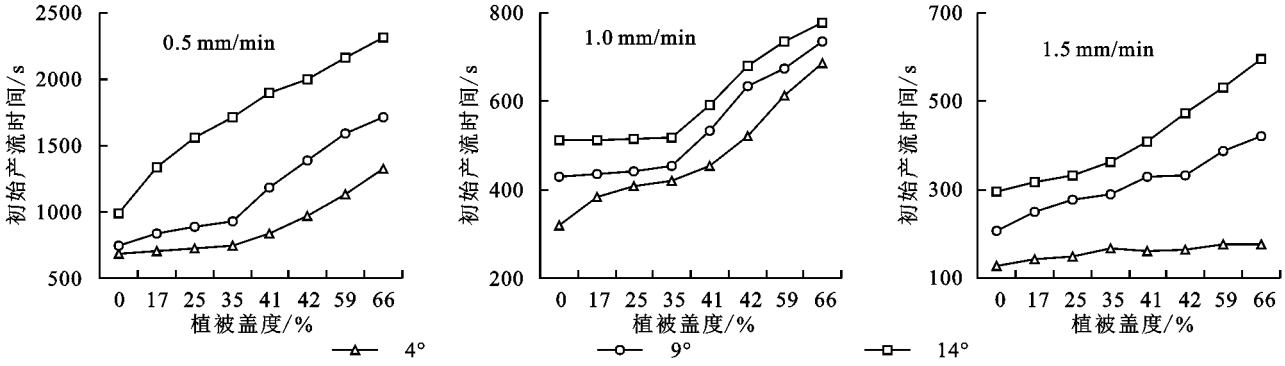


图 1 不同雨强下初始产流时间随植被盖度的变化

对产流时间与植被盖度和坡度进行多元线性回归分析,根据不同雨强下初始产流时间回归分析数据建立的方程为:

高雨强: $T_1=578.406+3.017X_1-39.69X_2$
($R^2=0.84$) (1)

中雨强: $T_2=1429.592+5.204X_1-89.067X_2$
($R^2=0.84$) (2)

低雨强: $T_3=1737.452+8.773X_1-99.635X_2$
($R^2=0.83$) (3)

式中: T_1, T_2, T_3 为不同雨强下的初始产流时间(s); X_1 为植被盖度(%); X_2 为坡度(°)。

从上述 3 个回归方程中可以看出不同雨强下,初始产流时间 T 与植被盖度 X_1 呈线性正相关,与坡度 X_2 呈线性负相关。3 个方程的拟合优度 R^2 均大于 0.8,说明回归方程对观测值的拟合度较好,可见对于草原型流域,通过建立植被盖度和坡度的多元线性回归模型,能够较好地模拟坡面产流时间的变化。

表 2 不同植被盖度下初始产流时间变化

植被盖度	雨强/ (mm · min ⁻¹)	坡度/ (°)	初始产流 时间/s	坡度/ (°)	产流 时间/s
裸地	1.0	4	509	9	427
35%		4	514	9	452
66%		4	774	9	733
裸地	1.5	4	295	9	207
35%		4	364	9	288
66%		4	596	9	421

表 3 不同坡度下初始产流时间变化

坡度/ (°)	降雨强度/ (mm · min ⁻¹)	初始产流时间/s		
		裸地	盖度 35%	盖度 66%
4	0.5	991	1126	2308
9	0.5	730	920	1710
14	0.5	670	731	1319
4	1	509	514	774
9	1	427	452	733
14	1	318	416	685
4	1.5	295	364	596
9	1.5	207	288	421
14	1.5	128	167	176

2.2 不同雨强下植被盖度和坡度对径流流速的影响

降雨及其径流引起的土壤侵蚀过程受众多因素的影响^[19],当坡面径流的侵蚀力大于土壤抗蚀力时,就会形成坡面径流侵蚀。影响坡面侵蚀动能因素很多,坡面径流流速是其中的一个重要指标^[20]。

图 2—4 列出了雨强为 1 mm/min 和雨强为 1.5 mm/min 不同植被盖度和坡度下坡面流速随时间的变化规律。

由图 2—4 可以看出,当雨强为 1 mm/min 时,裸地条件下(植被盖度为 0%),坡面流速的变化范围在 0.1 m/s ~ 0.25 m/s。放牧条件下(植被盖度为 35%),坡面流速的变化范围在 0.05 ~ 0.2 m/s。围封条件下(植被盖度为 66%),坡面流速的变化范围在 0.05 ~ 0.15 m/s。不同植被盖度下,坡面流速都是呈先增加后稳定的趋势,且植被覆盖度越高,坡面流速的变化越平缓,平均流速分别为 0.126 ~ 0.234 m/s, 0.077 ~ 0.174 m/s, 0.063 ~ 0.136 m/s。当植被盖度

为裸地条件下时,坡面流速在产流后的前 24 min 内快速增加,之后坡面流速的变化较缓逐渐达到相对平稳的状态;当植被盖度为放牧条件下时,坡面流速在产流后的前 30 min 内快速增加,之后坡面流速的变化较缓逐渐达到相对平稳的状态;当植被盖度为

围封条件下时,坡面流速在产流后的前 36 min 内快速增加,之后坡面流速的变化较缓逐渐达到相对平稳的状态;说明同一雨强下,随着植被盖度的增加,坡面流速达到最高流速的时间变长,植被有着延缓坡面流速的作用。

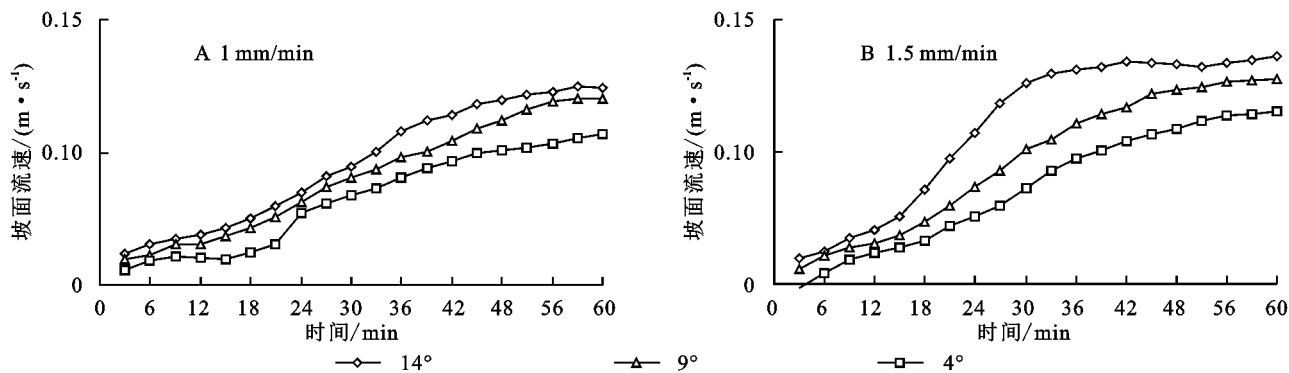


图2 围封条件下不同降雨类型下坡面流速随时间的变化

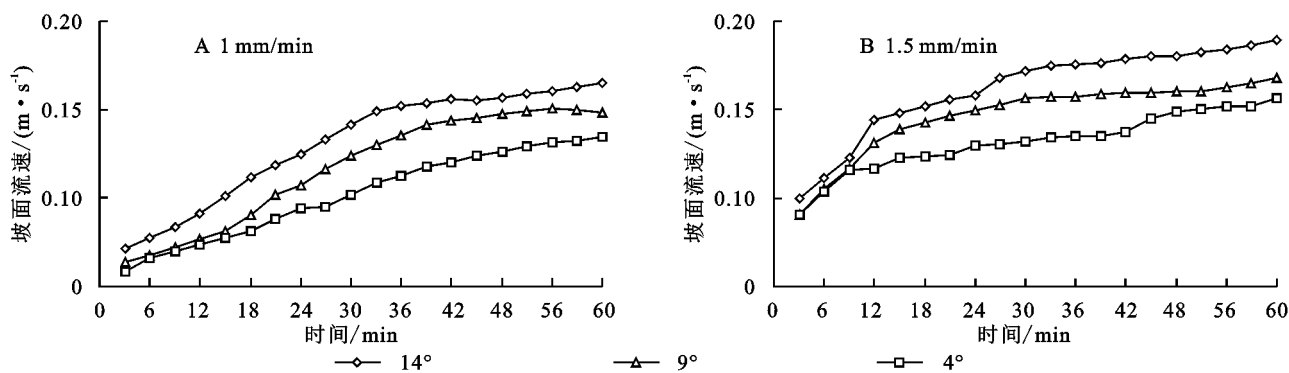


图3 放牧条件下不同降雨类型下坡面流速随时间的变化

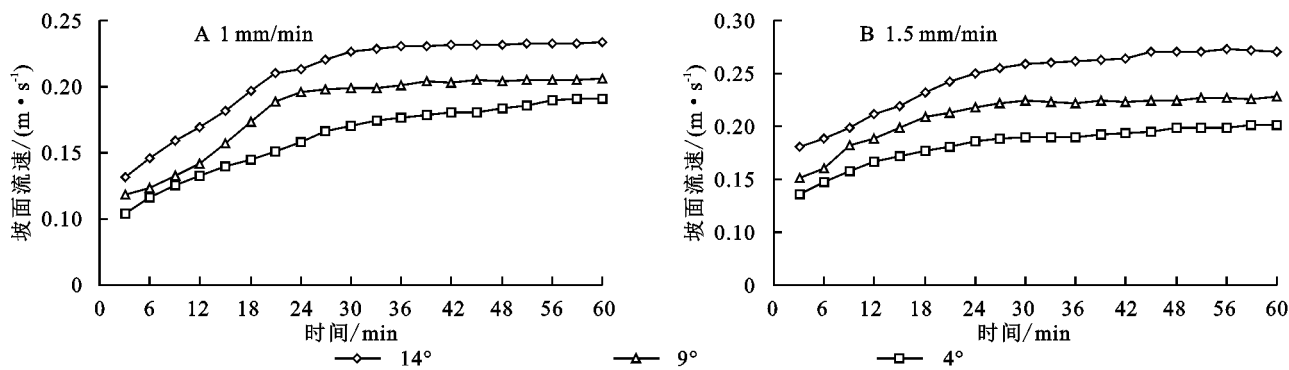


图4 裸地条件下不同降雨类型下坡面流速随时间的变化

就平均流速而言,裸地条件下的坡面流速是围封条件下的 1.72~2.0 倍。当雨强为 1.5 mm/min 时,坡面流速的变化范围分别在 0.14~0.23 m/s, 0.09~0.2 m/s, 0.06~0.15 m/s, 坡面流速的变化同样是呈先增加后稳定的趋势;比较各植被盖度下,可以看出不同坡度下坡面流速变化趋势相同,流速随坡度增加呈增加趋势。

通过 Excel 软件,对不同降雨类型下植被盖度和坡度与坡面流速进行回归分析,建立的多元线性回归方程为:

$$V_{1.5 \text{ mm/min}} = 0.9949 - 0.03307X_1 + 0.02348X_2$$

$$(R^2 = 0.86) \quad (4)$$

$$V_{1.0 \text{ mm/min}} = 0.8417 - 0.0126X_1 + 0.0057X_2$$

$$(R^2 = 0.85) \quad (5)$$

$$V_{0.5 \text{ mm/min}} = 0.728 - 0.0094X_1 + 0.0097X_2$$

$$(R^2 = 0.87) \quad (6)$$

式中: $V_{1.5 \text{ mm/min}}$, $V_{1.0 \text{ mm/min}}$, $V_{0.5 \text{ mm/min}}$ 为不同降雨类型下的坡面流速 (m^3/s); X_1 为植被盖度 (%); X_2 为坡度 ($^\circ$)。从关系式中可以看出不同降雨类型下坡面流速与植被盖度成线性正相关,与坡度成线性负相关。3 个方程的拟合优度 R^2 均大于 0.8,说明回归方

程对观测值的拟合度较好,可见对于草原型流域,通过建立植被盖度和坡度的多元线性回归模型,能够较好地模拟坡面流速的变化。

2.3 不同雨强下植被盖度和坡度对累计产流量的影响

图 5—7 是不同雨强、不同坡度和植被盖度对坡面累积产流量随时间变化的曲线过程图,从图中可以看出,3 种放牧条件下(植被盖度为 0%,35%,66%)变化趋势基本一致,坡面产流总量与植被盖度呈负相关关系,随着植被盖度的增加,植被对于减小坡面产流的效果越明显。

坡面产流总量与降雨强度和坡度呈正相关,雨强

和坡度越大,坡面产流总量越大。不同植被盖度下坡面累积产流量在雨强相同时,不同坡度(4°,9°,14°)下随着时间的增加均呈现平稳的增长趋势,同时,坡度越大,累积产流量随时间变化曲线的斜率也越大。3 个坡度下累积产流量随时间变化曲线的斜率大小顺序为:14°>9°>4°,表明累积产流量随坡度的增加呈增大的趋势;在坡度相同时,不同雨强(0.5 mm/min, 1.0 mm/min, 1.5 mm/min)下坡面累积产流量同样随着时间的增加均呈现平稳的增长趋势;相比于 0.5 mm/min 雨强下的累积产流量,1.5 mm/min 雨强下的累积产流量增加量较为明显。

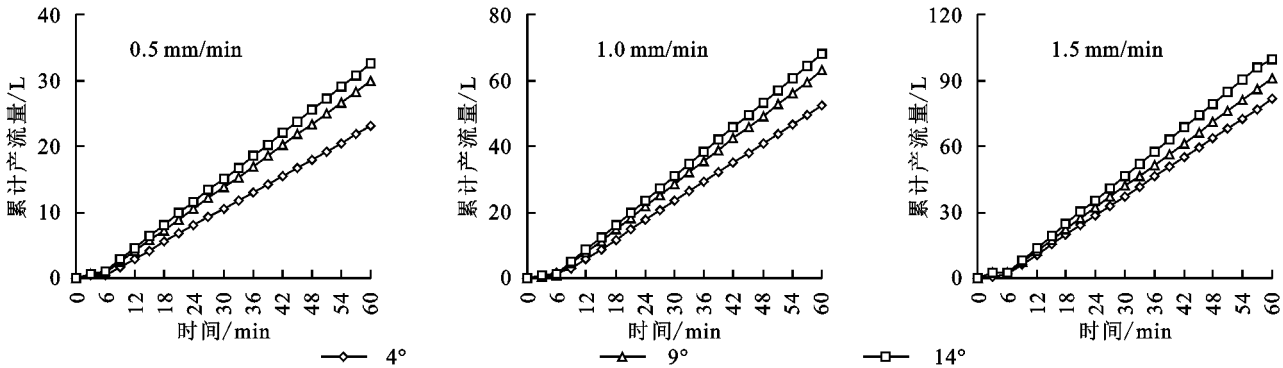


图 5 不同雨强下围封坡面累积产流变化过程曲线

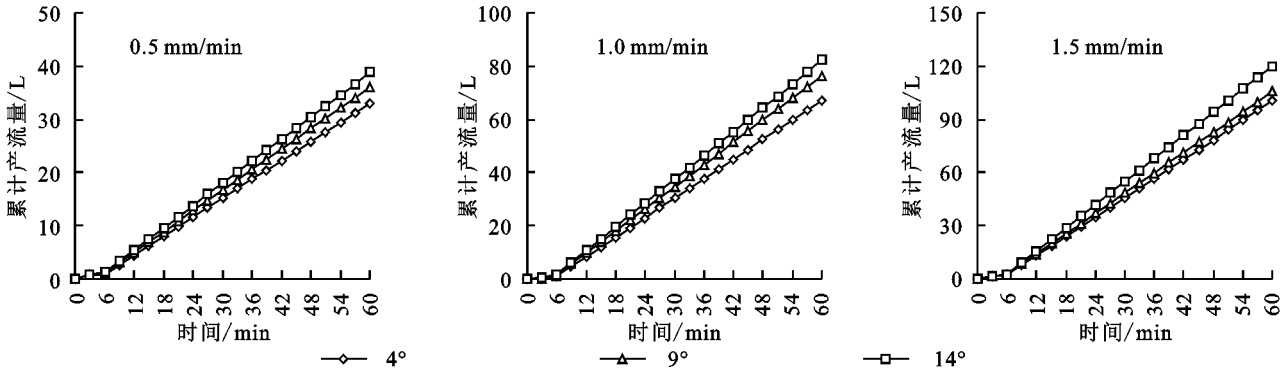


图 6 不同雨强下放牧坡面累积产流变化过程曲线

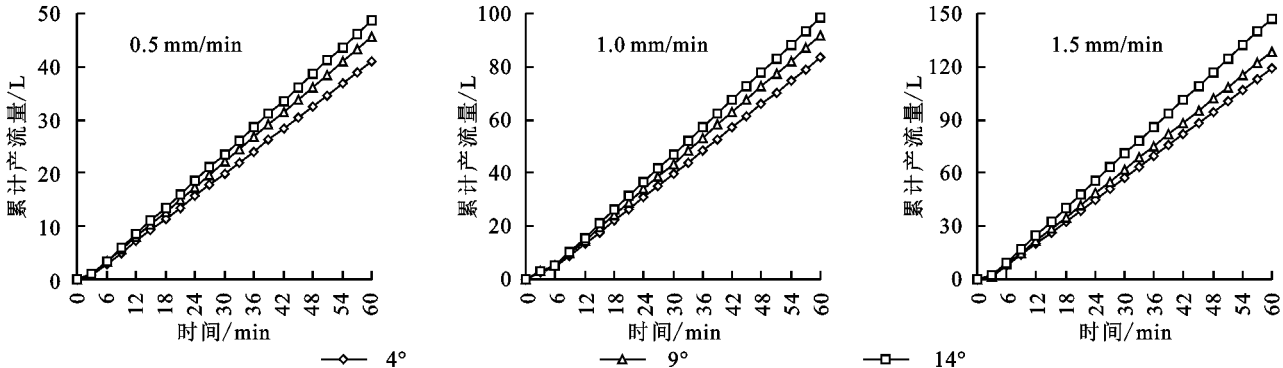


图 7 不同雨强下裸地坡面累积产流变化过程曲线

表 4 为不同坡度条件下围封坡面(植被盖度为 66%)产流总量变化,以 4°围封坡面为基准对照,当雨强相同时,坡度越大,坡面的产流总量也越大,在雨强为 0.5 mm/min 时,坡度为 9°和 14°坡面的产流总量是

对照 4°坡面的 1.29 倍和 1.41 倍;在雨强为 1.0/min 时,9°和 14°坡面的产流总量是对照 4°坡面的 1.18 倍和 1.27 倍;在雨强为 1.5/min 时,9°和 14°坡面的产流总量是对照 4°坡面的 1.12 倍和 1.22 倍。

表4 不同雨强条件下围封坡面产流总量变化

坡度/ (°)	产流量/L		
	0.5 mm/min	1.0 mm/min	1.5 mm/min
4	23.01	53.3	81.42
9	29.79	63.03	90.82
14	32.52	67.95	99.33

3 结论

(1) 植被盖度和坡度对初始产流时间的影响较为显著。当雨强为 1 mm/min 时, 3 个坡度 4°, 9°, 14° 坡面的初始产流时间, 相比裸地, 在植被盖度为 35% 的放牧条件下分别增加了 1.01, 1.06, 1.31 倍, 在植被盖度增加至 66% 的围封条件下分别增加了 1.52, 1.71, 2.15 倍。

(2) 雨强为 1.5 mm/min 时, 3 个坡度 4°, 9°, 14° 坡面的初始产流时间相比裸地, 放牧条件下分别增加了 1.23, 1.39, 1.30 倍, 围封条件下分别增加了 2.02, 2.03, 1.38 倍。对于草原型内陆河流域, 草地坡面的初始产流时间与植被盖度呈正相关关系, 与坡度呈负相关关系。

(3) 整个模拟降雨的坡面径流流速变化范围在 0.05~0.3 m/s, 不同植被盖度下坡面流速随时间基本呈现先增加后稳定的变化趋势。围封状态下(植被盖度为 66%), 坡面流速仅是放牧条件下(植被盖度为 35%)的 63%~68%, 可见植被盖度越高能有效减小坡面径流的流速。比较各植被盖度下不同坡度下的平均流速可发现, 流速随坡度呈现增加的趋势。

(4) 坡面产流总量与降雨强度和坡度呈正相关, 雨强和坡度越大, 坡面产流总量越大。坡面产流总量与植被盖度呈负相关, 随着植被盖度的增加, 植被对于减小坡面产流的效果越明显。

参考文献:

- [1] Kang L, Han X, Zhang Z, et al. Grassland ecosystems in China: review of current knowledge and research advancement[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2007, 362(1482): 997-1008.
- [2] 朝博, 乌云, 乌恩. 气候变化背景下内蒙古草原水资源保护与可持续利用[J]. 中国草地学报, 2012, 34(5): 99-106.
- [3] 郝爱华, 薛娴, 彭飞, 等. 青藏高原典型草地植被退化与土壤退化研究[J]. 生态学报, 2020, 40(3): 964-975.
- [4] 李海云, 姚拓, 高亚敏, 等. 退化高寒草地土壤真菌群落与土壤环境因子间相互关系[J]. 微生物学报, 2019, 59(4): 678-688.
- [5] 陈倩, 傅瑜, 余冬立, 等. 坡面产流产沙过程对植被过滤带响应的试验研究[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 104-109.
- [6] Fu X T, Zhang L P, Wang Y. Effect of slope length and rainfall intensity on runoff and erosion conversion from laboratory to field[J]. Water Resources, 2019, 46(4): 530-541.
- [7] Han J, Gao J, Luo H. Changes and implications of the relationship between rainfall, runoff and sediment load in the Wuding River basin on the Chinese Loess Plateau[J]. Catena, 2019, 175: 228-235.
- [8] Guo M, Wang W, Li J, et al. Runoff characteristics and soil erosion dynamic processes on four typical engineered landforms of coalfields: An in-situ simulated rainfall experimental study[J]. Geomorphology, 2020, 349(15): 106896.
- [9] 丛月, 张洪江, 程金花, 等. 草本植物对雨滴动能的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 114-118.
- [10] Zhao G, Gao P, Tian P, et al. Assessing sediment connectivity and soil erosion by water in a representative catchment on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2019, 185: 104284.
- [11] Cui Z, Wu G L, Huang Z, et al. Fine roots determine soil infiltration potential than soil water content in semi-arid grassland soils[J]. Journal of Hydrology, 2019, 578: 124023.
- [12] 杨春霞, 姚文艺, 肖培青, 等. 植被覆盖结构对坡面产流产沙的影响及调控机制分析[J]. 水利学报, 2019, 50(9): 1078-1085.
- [13] 蒋秋玲, 信忠保, 余新晓, 等. 北京山区侧柏林地坡面初始产流时间影响因素[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(4): 1-8. DOI:10.16843/j. sswc, 2019.04.001.
- [14] 陶宇, 温仲明, 朱朵菊, 等. 黄土丘陵区植物群落功能多样性/物种多样性与产流产沙响应关系[J]. 水土保持研究, 2018, 25(4): 120-128. DOI:10.13869/j. cnki. rswc, 2018.04.018.
- [15] 田娜玲, 王占礼, 张庆玮, 等. 施加 NPD 对黄土坡面径流流速和侵蚀产沙的影响[J]. 水土保持研究, 2019, 26(1): 22-28. DOI:10.13869/j. cnki. rswc, 20180827.001.
- [16] 杨晓俊. 降雨产流影响因素分析[J]. 地下水, 2007(5): 50-51.
- [17] 张锐波, 张丽萍, 钱婧, 等. 雨强和植被覆盖度对坡地侵蚀产沙影响强度研究[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(5): 206-212.
- [18] 蒋秋玲, 信忠保, 余新晓, 等. 北京山区侧柏林地坡面初始产流时间影响因素[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(4): 1-8.
- [19] 陈泽涛, 沙占江, 王求贵, 等. 高寒草原草甸区土壤侵蚀及植被覆盖对养分空间分布的影响: 以兴海盆地子科滩为例[J]. 水土保持研究, 2019, 26(6): 226-234.
- [20] 张锐波, 张丽萍, 付兴涛. 坡面侵蚀产沙与水力学特征参数关系模拟[J]. 水土保持学报, 2017, 31(5): 81-86.