

不同放牧强度荒漠草原产流产沙过程模拟

张梦璇¹, 郭建英², 董智¹, 李红丽¹, 李锦荣², 周晓莹¹, 韩秀峰¹, 陈鹏¹

(1. 山东省土壤侵蚀与生态修复重点试验室, 泰山森林生态系统定位研究站,

山东 泰安 271018; 2. 水利部牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020)

摘要: 为揭示长期放牧的荒漠草原坡面产流产沙特征, 以放牧 15 年的 4 种放牧强度的内蒙古荒漠草场土壤为研究对象, 在室内人工模拟降雨条件下, 探究放牧强度及雨强对草原坡面产流产沙耦合过程的影响。结果表明: (1) 不同雨强下, 不同放牧草场间的初始产流时间均随放牧强度的增大而提前; 产流速率呈现先增长后稳定的状态, 4 种放牧强度草场的产流速率规律及其波动幅度均为重度放牧(HG) > 中度放牧(MG) > 对照(CK) > 轻度放牧(LG), 且雨强对产流速率的影响大于放牧强度。荒漠草原累计径流量与降雨历时呈线性相关, 且拟合度较高; (2) 荒漠草原产沙速率变化呈现多谷多峰的特点, 雨强和放牧强度及二者的交互效应对产沙速率有极显著影响。不同雨强下, 4 种放牧强度草场的产沙速率规律及其波动幅度均为 HG > MG > CK > LG。泥沙流失总量与降雨历时之间呈二次曲线关系。

关键词: 荒漠草原; 放牧强度; 人工模拟降雨; 产流产沙

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)05-0041-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2018.05.007

Simulation of Runoff and Sediment Yield in Desert Steppe with Different Grazing Intensities

ZHANG Mengxuan¹, GUO Jianying², DONG Zhi¹, LI Hongli¹,

LI Jinrong², ZHOU Xiaoying¹, HAN Xiufeng¹, CHEN Peng¹

(1. Shandong Key Laboratory of Soil Erosion and Ecological Restoration, Taishan Forestry Ecosystem Research Station Tai'an, Shandong 271018; 2. Institute of Water Resources for Pastoral Area, Ministry of Water Resources, Hohhot 010020)

Abstract: To reveal the characteristics of runoff and sediment yield on the slope of the desert steppe for long-term grazing, taking the grazing desert steppes (Inner Mongolia area) with four different intensities as the research object, and all steppe were grazing for 15 years. Indoor artificial simulated rainfall was conducted to explore the effects of grazing intensity and rainfall intensity on coupling process of runoff and sediment production on the steppe slope. The results were as follows: (1) Under the different rainfall intensities, the initial runoff time of different grazing steppe advanced with the increasing of grazing intensity, and runoff yield rates increased first and then showed a state of stability. The runoff yield rate and its fluctuating range both followed the order of heavy grazing (HG) > moderate grazing (MG) > control (CK) > light grazing (LG). The influence of rainfall intensity on runoff yield rate was greater than that of grazing intensity. The cumulative runoff yield of desert steppe was linearly related to rainfall duration and the fitting degree was higher. (2) The change of sediment production rate in desert steppe was characterized by multi-valley and multi-peak. Rainfall intensity, grazing intensity and their interaction had a significant effect on sediment production rate. Under different rainfall intensities, the sediment production rate and its fluctuating range followed the order of HG > MG > CK > LG. The relationship between total amount of sediment loss and rainfall duration fit a quadratic curve.

Keywords: desert steppe; grazing intensity; artificial simulated rainfall; runoff and sediment yield

草原是我国面积最大的陆地生态系统,占国土面积的 40% 左右^[1]。内蒙古荒漠草原面积占中国草原面积的 2.12%^[2],且主要分布于生态脆弱区,对人类干扰、气候和环境变化十分敏感。在人类不合理的放牧和自然条件及其叠加效应影响下,草原植被退化严重,水土流失加剧^[3]。荒漠草原区内年降水分布不均,6—8 月降水量占全年的 70% 以上,常以暴雨出现,草场易形成径流冲刷,造成严重的土壤侵蚀^[4]。降雨是土壤侵蚀的主要动力来源^[5],降雨强度不同,土壤侵蚀的程度不同。国内外学者就雨强对土壤侵蚀的影响进行了大量研究,张会茹等^[6]研究发现,雨强与产流量及侵蚀产沙量呈正相关关系。车明轩等^[7]研究表明,坡度和雨强共同影响紫色土壤区坡面的产流,随着雨强和坡度的增大,坡面侵蚀更加剧烈,雨强由次要侵蚀因子转为主要侵蚀因子。李桂芳等^[8]对雨强、坡度、坡长及 3 因素间的交互作用对黑土区坡面产流产沙的影响进行了研究,并建立了影响地表径流量和侵蚀量的多因子回归方程。樊才睿等^[9]研究表明,放牧制度及雨强与产流率、产沙量间存在显著的正效应,径流总量及产沙总量为自由放牧草场>轮牧草场>休牧草场。Bartley 等^[10]评估改良牧场管理对产流产沙的影响,得出植被覆盖率与径流量、泥沙量呈负相关关系。众多研究表明,对于雨强与土壤侵蚀关系的研究主要集中于黄土区、红壤区、紫色土壤区及黑土区等重点区域,对草原区的研究侧重于不同放牧制度对土壤侵蚀的影响,而变化雨强对不同放牧强度草场土壤侵蚀的研究相对薄弱。本文采用人工模拟降雨试验,分析荒漠草原在放牧强度及雨强差异条件下产流产沙的特征,揭示放牧草场产流产沙的一般规律,为科学制定草原生态保护和草原生态系统的可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于内蒙古自治区中部的包头市达尔罕茂明安联合旗希拉穆仁镇境内,地理坐标在 41°20′—42°40′ N, 109°16′—111°25′ E。气候为中温带干旱大陆性气候,春秋干旱多风,冬季寒冷干燥。降雨主要集中在 7—9 月,多年平均降水量 281 mm,年最多降水量 425.2 mm(2003 年),最少降水量 142.6 mm(1966 年),中等年($P=50\%$)、中枯年($P=75\%$)、中湿年($P=25\%$)降雨量分别为 286.4、224.8、330.1 mm,日最大降水量 90.8 mm。土壤类型为砂质栗钙土,植被是以短花针茅(*Stipa breviflora* Griseb.)为主的荒漠草原植被,平均植被覆盖 44%,建群种为短花针茅,优势种为冷蒿(*Artemisia frigida* Willd.)、无芒隐子草(*Cleistogenes songorica* (Roshev.)

Ohwi),主要伴生种有银灰旋花(*Convolvulus ammannii* Desr.)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altai-cus* (Willd) Novopokr)、羊草(*Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel.)等。

1.2 试验设计

研究区从 2002 年开始围栏放牧,每个区组设有轻度放牧(LG)、中度放牧(MG)、重度放牧(HG)和不放牧对照(CK),绵羊密度分别为轻度放牧(0.15 只/($\text{hm}^2 \cdot \text{月}$))、中度放牧(0.3 只/($\text{hm}^2 \cdot \text{月}$))、重度放牧(0.45 只/($\text{hm}^2 \cdot \text{月}$))和对照(不放牧)。每年 6 月开始放牧,12 月初结束,每天早上 8:00 将家畜赶入放牧区让其自由采食,18:00 赶回畜圈休息。

2016 年 7 月 30—31 日在不同放牧强度区取原状土体(对应植被盖度为未放牧 85%、轻度放牧 60%、中度放牧 43%、重度放牧 25%),置于不锈钢制的径流小区钢槽内(长×宽×高为 100 cm×30 cm×30 cm,土槽径流出口处安装“V”形钢制径流收集槽收集径流),使得土样顶部与径流小区前端集流面相平,土样四周与径流小区相接部分用石蜡密封。每个区组 3 组重复。将装有土样的径流小区钢槽运输至水利部牧区水利科学研究所流域水循环模拟与调控国家重点实验室草地水循环与生态修复实验基地,放置于移动式降雨模拟集流装置内^[11]。8 月 1 日至 9 月 12 日开始人工模拟降雨试验,同步在室内分析径流量与泥沙量。

模拟降雨试验采用下喷式便携模拟降雨系统,雨强连续变化范围 15~150 mm/h,降雨均匀度系数 0.87~0.93,雨滴大小调控范围 1.7~2.8 mm,降雨测量精度 0.01 mm/min,可模拟多种雨强降雨过程。根据研究区 10 年间实际降雨情况,确定本试验雨强分别为 20、40、60 mm/h,每种雨强 3 次重复,研究区坡度平均 5°,故本试验采用坡度为 5°。试验共进行 36 场,单场降雨历时 60 min,正式降雨试验前进行预降雨保证草场的土壤含水量基本一致,正式降雨时用防雨布暂时遮盖试验钢槽,确定降雨均匀后,揭开防雨布计时,当试验槽出口处水流连续滴落或成股时,记录为降雨初始产流时间。利用集流装置收集径流,由于降雨前期产流不稳定,每 2 min 更换 1 次集流装置;初始产流 20 min 后,产流相对稳定,每 5 min 更换 1 次。降雨结束后过滤径流样品,烘干并称量径流中的泥沙含量,计算得产流速率和产沙速率。每场降雨结束后,径流槽晾晒 48 h,于阴凉处静置 3 天后用于下一场降雨。降雨前测定各放牧强度的紧实度在 35.53~38.37 kg/cm²,含水率稳定在(3.10±0.12)%,各处理间差异不显著。

1.3 数据分析

试验数据采用 Excel 2016 和 SPSS 22.0 软件处理分析,Origin 9.1 软件作图。

2 结果与分析

2.1 放牧强度、雨强对初始产流时间的影响

由表 1 可知,雨强为 20 mm/h 时,对照和轻度放牧草场均未产流,中度放牧草场的初始产流时间较重度放牧草场提前了 4.58 min;雨强为 40 mm/h 时,对照、轻度、中度、重度放牧草场的初始产流时间之比为 5.88 : 5.82 : 1.03 : 1,对照和轻度放牧草场的初始产流时间相差不大,中度和重度放牧草场的初始产流时间无明显差异;雨强为 60 mm/h,轻度放牧草场较对照草场初始产流时间提前了 0.10 min,中度放牧草场初始产流时间较对照草场提前了 17.29 min,重度放牧草场初始产流时间较对照草场提前了 18.72 min。

表 1 不同雨强下不同放牧强度草场的初始产流时间

放牧强度	单位: min		
	20/ (mm · h ⁻¹)	40/ (mm · h ⁻¹)	60/ (mm · h ⁻¹)
CK	0	22.92	20.47
LG	0	22.71	20.37
MG	12.73	4.03	3.18
HG	8.15	3.90	1.75

2.2 不同放牧强度荒漠草原的产流特征

由图 1 可知,不同放牧强度下,降雨初期,产流速率小,随着降雨历时的延长,产流速率增加,而后达到较为稳定状态,且 $HG > MG > CK > LG$ 。方差分析表明,各雨强下产流速率差异极显著($P < 0.01$),放牧强度与产流速率存在正相关关系。雨强为 20 mm/h,中度和重度放牧草场的初始产流速率大致相同,随降雨历时的延长,2 个放牧草场间的产流速率发生不同的变化,重度放牧草场产流速率比中度放牧草场的变化大,达到稳定状态时,重度放牧草场产流速率是中度放牧草场的 2 倍左右。雨强为 40 mm/h,各放牧草场在降雨前期,产流速率呈增长趋势;降雨中期,产流速率产生波动,但变化不大;降雨后期,产流速率达到稳定状态。对照、轻度、中度和重度放牧草场的平均产流速率分别为 42.50,45.80,76.08,110.59 mL/min。对照草场比轻度放牧草场平均产流率减少了 7.76%;中度比轻度放牧草场平均产流率增加了 66.11%;重度比轻度放牧草场平均产流率增加了 141.46%。雨强为 60 mm/h,产流速率的变化较其他 2 个雨强不同,对照和轻度放牧草场在其整个降雨过程中产流速率波动变化较小且稳定;而中度和重度放牧草场的产流速率都存在急剧增加阶段,且增加后迅速进入稳定状态。对照、轻度、

中度、重度放牧草场的平均产流速率分别为 90.18,69.34,193.08,242.06 mL/min。对照、中度、重度放牧草场比轻度放牧草场平均产流率分别增加了 30.05%,178.45%,249.10%。

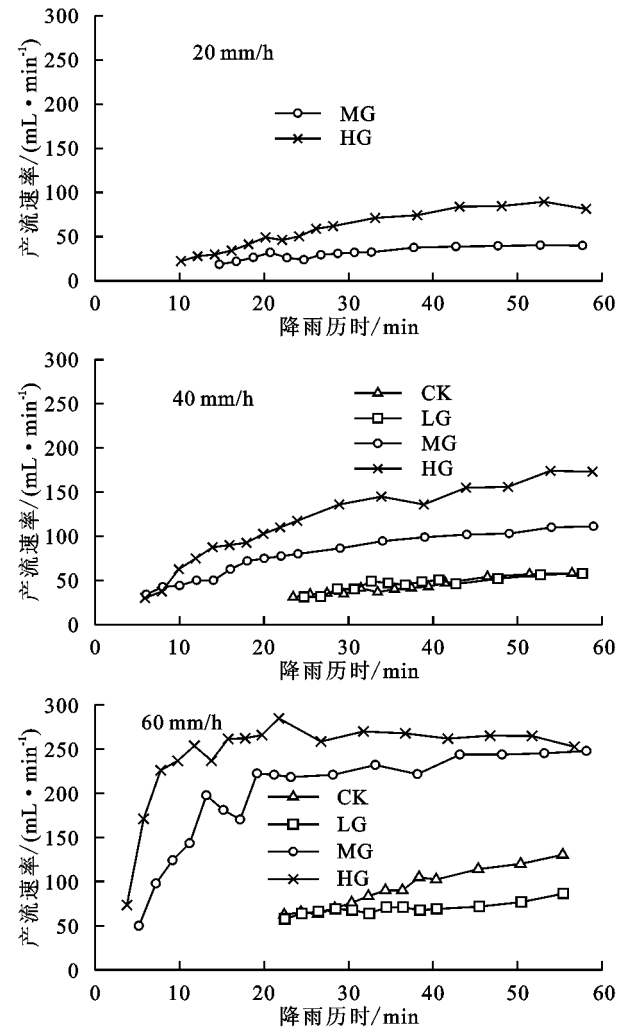


图 1 不同雨强下产流速率变化过程

由表 2 可知,累计径流量随降雨历时的延长逐渐增加,且表现为线性增长趋势,各雨强下不同放牧强度的累计径流量(Y)与降雨历时(X)间符合线性方程 $Y=aX+b$,相关系数均达 0.99 以上,拟合方程的直线斜率随放牧强度的增大而增大,直线斜率大小为 $HG > MG > CK > LG$ 。显然,放牧强度越小,植被覆盖度越高,能有效延缓产流,并显著减小产流量。

2.3 不同放牧强度荒漠草原的产沙特征

由图 2 可知,各雨强下的产沙速率均存在波动情况,且产沙速率较产流速率更为复杂,呈现多谷多峰的特点。产沙速率整体上表现为 $HG > MG > CK > LG$ 。20 mm/h 雨强时,中度和重度放牧草场的产沙速率变化规律较为一致,均呈现波动增长,且重度放牧草场产沙速率在此阶段明显高于中度放牧草场,中度放牧草场在降雨 30 min 时达到产沙速率的峰值,而重度放牧草场的产沙速率峰值则出现在降雨 25

min 时。但达到稳定状态时,重度放牧草场的产沙速率约是中度放牧草场的 1.40 倍。40 mm/h 雨强时,不同放牧草场的产沙速率变化波动大且复杂。重度放牧草场产沙速率波动大,明显高于其他 3 个放牧强度下的产沙速率,且在降雨后期产沙速率出现下降趋势。对照和轻度放牧草场的产沙速率变化较为一致。60 mm/h 雨强时,对照和轻度放牧草场在产沙前期产沙速率差异不大,但随着降雨历时的延长,产沙速率达到稳定状态,且对照放牧草场产沙速率逐渐高于轻度放牧草场。降雨前期中度和重度放牧草场间产沙速率变化较为相似且复杂,降雨后期,中度放牧草场产沙速率逐渐减小且达到稳定状态,重度放牧草场有峰值,且峰值过后有下降趋势。

表 2 不同放牧强度累计径流量与降雨历时拟合方程

雨强/ (mm · h ⁻¹)	放牧 强度	拟合方程	相关 系数
20	CK	/	/
	LG	/	/
	MG	$y=34.90x-543.69$	0.997
	HG	$y=68.55x-913.58$	0.991
40	CK	$y=46.50x-1101.19$	0.994
	LG	$y=49.36x-1219.34$	0.998
	MG	$y=88.56x-778.87$	0.994
	HG	$y=132.19x-1246.24$	0.993
60	CK	$y=99.87x-2304.64$	0.993
	LG	$y=71.49x-1528.66$	0.999
	MG	$y=220.36x-1626.87$	0.998
	HG	$y=261.58x-1104.60$	1.000

注: x 为降雨历时(min); y 为累计径流量(mL); / 表示未产流。

由图 3 可知,不同雨强下各放牧强度的泥沙流失总量变化规律大致为 $HG > MG > CK > LG$; 雨强为 20 mm/h,重度放牧草场的泥沙流失总量是中度放牧的 1.69 倍;雨强为 40 mm/h,重度、中度放牧草场和对照的泥沙流失总量是轻度放牧的 6.31, 2.63, 1.28 倍;雨强为 60 mm/h,重度、中度放牧草场和对照的泥沙流失总量分别是轻度放牧草场的 6.59, 4.07, 1.88 倍。随着放牧强度的增加,泥沙流失总量递增幅度增大。不同雨强下各放牧草场均表现为泥沙流失总量随累计径流量的增加而增加。不同雨强各放牧强度草场的泥沙流失总量均与降雨历时间呈极显著相关关系($P < 0.01$),泥沙流失总量与降雨历时拟合为二次曲线关系,相关系数均达 0.98 以上。

2.4 雨强和放牧强度对产流产沙的差异性分析

由图 4 可知,不同雨强下不同放牧草场间产流、产沙速率波动幅度均为 $HG > MG > CK > LG$ 。20 mm/h 雨强下,重度放牧草场数据分散程度大于中度

放牧草场分散程度,说明重度放牧草场的产流速率波动大;40 mm/h 雨强下,重度放牧草场“须”(矩形的上下 2 条线段,上端代表最大值,下端代表最小值)的范围超出了主体范围(矩形),数据分散,产流速率波动幅度最大。中度和重度放牧草场箱体相差不大,但中度放牧草场小于重度放牧草场的“须”,产流速率波动幅度也相对小。对照和轻度放牧草场的数据相差不大且显著低于中度和重度放牧草场。60 mm/h 雨强下,中度和重度放牧草场“须”的范围均超出了主体范围,产流速率波动幅度大,且中度和重度放牧草场显著高于对照和轻度放牧草场的数据波动幅度。轻度、中度和重度放牧草场均存在异常值。由此可知,不同雨强下,放牧强度越大,草场对径流的调控能力越差。对比产沙速率箱图,不同雨强下不同放牧草场产沙速率的“须”的范围均超出了主体范围,数据分散程度大,产沙速率波动大。40 mm/h 雨强下,对照、轻度、中度放牧草场所有产沙速率数据均处于重度放牧草场“须”的范围,说明重度放牧草场与其他 3 个放牧强度草场存在显著差异;60 mm/h 雨强下,轻度放牧草场的数据分散程度最小,产沙速率波动最小。

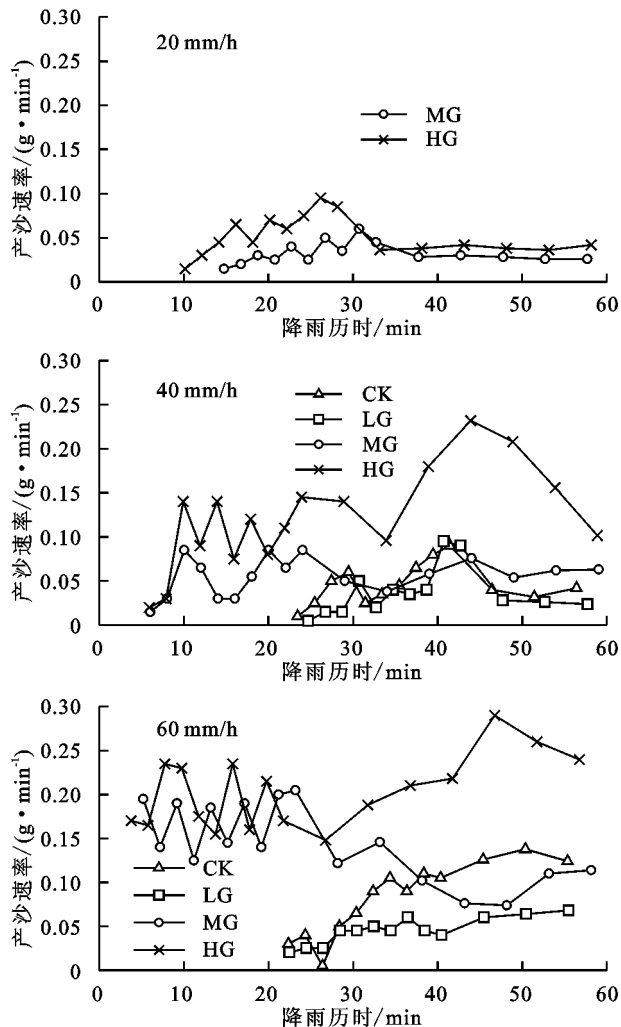


图 2 不同雨强下产沙速率变化过程

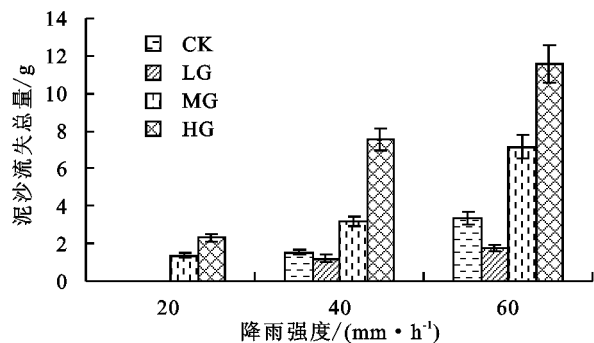


图3 不同雨强下泥沙流失总量

荒漠草原的产流产沙特征涉及雨强、放牧强度2个

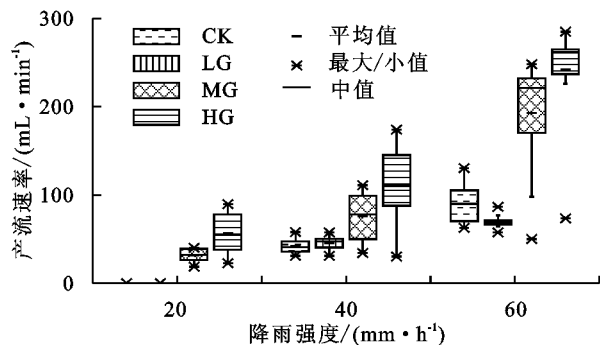


图4 不同雨强下放牧草场的产流和产沙速率箱图

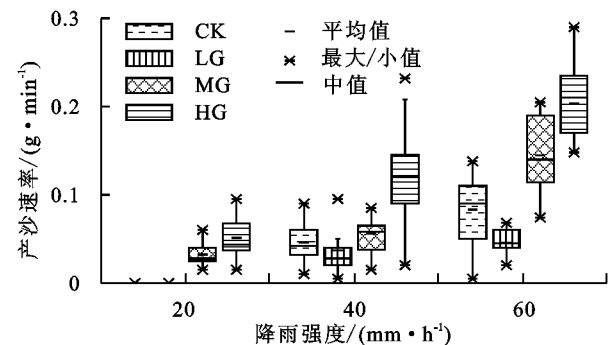
综合考虑雨强和放牧强度对产流速率、产沙速率的交互效应,方差分析结果表明,雨强($F=101.119, P<0.01$)对产流速率的影响大于放牧强度($F=35.020, P<0.01$)的影响,而二者的交互效应($F=9.098$)相对较弱。对比产沙速率的 F 检验值得,雨强($F=56.648, P<0.01$)对产沙速率的影响大于放牧强度($F=34.429, P<0.01$)的影响,其交互效应($F=6.598$)也相对较弱。

3 讨论

3.1 不同雨强对荒漠草原产流特征的影响

初始产流时间是影响坡面产流产沙的重要参数之一^[12]。本研究表明,不同雨强下初始产流时间随放牧强度的增加而提前。雨强为20 mm/h时,对照和轻度放牧草场均未产流,主要是由于对照和轻度放牧草场植被覆盖度较高,植被生长状况好,植物的地上部分发挥较好的截留作用。随放牧强度的增加草场植被覆盖度降低,对降雨的拦截作用小,极易产生径流。放牧强度越大,牲畜践踏能力越强,土壤越紧实,土壤入渗率越小,地表汇集水分越快,产流时间越短。各雨强下草场开始产流的速率基本一致,是由于降雨初期,土壤前期含水量基本相同且较低,降落雨水全部渗入土壤,不同放牧强度草场间的差异在短时间内并未完全显现。产流速率随降雨历时的延长呈增长趋势,表明土壤含水量随降雨历时的延长而增加,土壤入渗速率减小,此时雨强大于土壤的入渗速率,使地表径流不断汇集,产流强度增大。由于放牧

独立因素。为更加明确其特征,对两个因素进行单因素方差分析。由于20 mm/h雨强下仅有中度和重度放牧草场产流,故不作分析。雨强为40 mm/h,对照、轻度放牧草场间产流速率无显著差异($P>0.05$),但两者与中度、重度放牧草场的产流速率均存在极显著差异($P<0.01$);对照、轻度和中度放牧草场间的产沙速率无显著差异($P>0.05$),但三者均与重度放牧草场的产沙速率存在极显著差异($P<0.01$)。雨强为60 mm/h,产流速率的差异性与40 mm/h雨强下一致;但4种放牧强度的产沙速率均存在极显著差异($P<0.01$)。



强度不同,土壤容重、孔隙度等^[13]物理性状变化规律不同,导致各雨强下放牧草场间产流速率出现不同状态的增长。降雨继续,入渗速率都达到自身的平衡状态,在没有外界因素的干扰下,产流速率平衡状态不易被打破。本研究表明,各雨强下的放牧草场产流速率规律为 $HG>MG>CK>LG$,其中对照放牧草场大于轻度放牧草场的产流速率。Wang等^[14]对放牧荒漠草原研究发现,放牧草场有机质含量为 $LG>MG>CK>HG$,这是由于适度放牧使养分通过牲畜采食、践踏、排泄等活动回归到土壤库,改变了土壤的通透性,增加草场的保水和持水能力。

各雨强下不同放牧强度的累计径流量变化趋势一致并有一定规律性,即 $HG>MG>CK>LG$ 。放牧强度越大,累计径流量增加的幅度越大,累计径流量与降雨历时拟合为线性相关,这与甘艺贤等^[15]研究相一致。重度放牧草场总径流量最高,主要是由于该区域常年处于过度放牧状态,牲畜多,啃食牧草能力强,使植被覆盖率减小,土壤饱和的时间缩短,更多的雨水转化为径流^[16]。

3.2 不同雨强对荒漠草原产沙特征的影响

雨滴击溅破坏土壤结构,较大的雨滴动能分散放牧草场上土壤颗粒。坡面一旦产生径流,松散的土壤颗粒易随径流输出坡面,造成土壤侵蚀。径流量增大,流速加快,相应增加了径流的输沙能力^[17]。各雨强下,不同放牧草场在整个产沙过程中均呈波动状

态,降雨伊始无泥沙产生是由于初期降雨量小于土壤的入渗量,无径流产生,故无泥沙。产沙速率出现下降趋势是由于土壤封闭层的形成,雨滴对土壤表面的击溅作用逐渐减弱,径流的剥蚀能力下降,较大的土壤颗粒滞留在径流出口附近,没有较大的冲刷力^[18]。而后随着降雨的继续,径流的汇集,形成较大的冲力,此时较大的土壤颗粒被径流带走,出现了产沙速率回升趋势。本研究中各雨强下不同放牧草场间的产沙速率规律与产流规律相同,均为 $HG > MG > CK > LG$ 。轻度放牧草场产沙速率小是由于草场载畜率不大,适度放牧刺激了植被地上部分的生长,进而促进了地下根系的发育^[19],植物根系部分束缚土壤颗粒,土壤的凝聚力增强,土壤性质稳定,径流剥蚀土壤的能力和径流运移泥沙的能力趋于平衡,故产沙速率稳定。

不同雨强下泥沙流失总量为 $HG > MG > CK > LG$,且泥沙流失总量与降雨历时拟合为二次曲线相关,这与王玉霞等^[20]研究相一致。各放牧草场径流不断汇集,径流搬运较大土壤颗粒的能力增强,泥沙流失总量增多。

4 结论

(1)雨强和放牧强度共同影响草场的初始产流时间,不同雨强下不同放牧强度草场的初始产流时间随放牧强度的增大有所提前。不同雨强下不同放牧草场的产流速率均呈现先增长后稳定的状态,不同放牧草场间产流速率规律及其波动幅度均为 $HG > MG > CK > LG$,且雨强对产流速率的影响大于放牧强度。

(2)不同雨强下不同放牧草场的产沙速率变化比较复杂,呈现多谷多峰的特点。不同雨强下不同放牧草场产沙速率规律及其波动幅度均为 $HG > MG > CK > LG$,且雨强的影响作用大于放牧强度,交互效应的影响并不显著。

(3)不同雨强下不同放牧草场累计径流量与降雨历时拟合为线性相关,相关性好,相关系数均大于 0.99;泥沙流失总量与降雨历时拟合为二次曲线关系,相关系数在 0.98 以上。

参考文献:

- [1] 刘源. 2013 年全国草原监测报告[J]. 中国畜牧业, 2014 (6): 18-33.
- [2] 沈海花, 朱言坤, 赵霞, 等. 中国草地资源的现状分析[J]. 科学通报, 2016, 61(2): 139-154.
- [3] 张祖群. 草原文化景观的退化机制: 基于鄂尔多斯草原与坝上草原对比[J]. 农学报, 2015, 5(3): 63-70.
- [4] 赵伟, 杨培岭, 李海山, 等. 呼伦湖流域 3 种利用方式草场水土及氮磷流失特征[J]. 农业工程学报, 2011, 27 (9): 220-225.
- [5] 陈丽燕, 雷廷武, 啜瑞媛. 坡面薄层水流优势流速研究[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(5): 130-137.
- [6] 张会茹, 郑粉莉. 不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(3): 40-43.
- [7] 车明轩, 宫渊波, 穆罕默德·纳伊姆·汉, 等. 人工模拟降雨条件下不同雨强、坡度对紫色土坡面产流的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 164-168.
- [8] 李桂芳, 郑粉莉, 卢嘉, 等. 降雨和地形因子对黑土坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(4): 147-154.
- [9] 樊才睿, 李畅游, 孙标, 等. 不同放牧制度草场产流产沙过程模拟试验[J]. 水土保持学报, 2016, 30(1): 47-53.
- [10] Bartley R, Corfield J P, Abbott B N, et al. Impacts of improved grazing land management on sediment yields, Part 1: Hillslope processes [J]. Journal of Hydrology, 2010, 389(3): 237-248.
- [11] 董智, 郭建英, 李红丽, 等. 一种移动式降雨模拟集流装置: 中国, ZL201520728914. X[P]. 2015-12-30.
- [12] 胡梓超, 周蓓蓓, 王全九. 模拟降雨条件下纳米碳对黄土坡面养分流失的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30 (4): 1-6.
- [13] 王合云. 不同放牧强度对短花针茅荒漠草原植物群落及土壤的影响[D]. 山东 泰安: 山东农业大学, 2016.
- [14] Wang H, Dong Z, Guo J, et al. Effects of grazing intensity on organic carbon stock characteristics in *Stipa breviflora* desert steppe vegetation soil systems [J]. Rangeland Journal, 2017, 39(2): 169-177.
- [15] 甘艺贤, 戴全厚, 伏文兵, 等. 基于模拟降雨试验的喀斯特坡耕地土壤侵蚀特征[J]. 应用生态学报, 2016, 27 (9): 2754-2760.
- [16] Wu L, Peng M, Qiao S, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on runoff and sediment yield characteristics of bare loess soil [J]. Environmental Science & Pollution Research, 2018, 25(4): 1-8.
- [17] 张乐涛, 李占斌, 王彬彬. 坡面径流类型对侵蚀产沙及水沙传递关系的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31 (20): 124-131.
- [18] 余长洪, 李就好, 陈凯, 等. 强降雨条件下砖红壤坡面产流产沙过程研究[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 7-10.
- [19] 李凤霞, 李晓东, 周秉荣, 等. 放牧强度对三江源典型高寒草甸生物量和土壤理化特征的影响[J]. 草业科学, 2015, 32(1): 11-18.
- [20] 王玉霞, 刘国彬, 王国梁, 等. 茵陈蒿群落分布格局对坡面产流产沙的影响[J]. 水土保持研究, 2010, 17(1): 62-66.