

土壤水蚀对荒漠草原针茅斑块分布格局形成的影响

王子薇¹, 杨振奇^{2,3}, 郭建英^{2,3}, 田甜^{1,2,3}

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2.水利部 牧区水利科学研究所, 内蒙古 呼和浩特 010020; 3.内蒙古阴山北麓草原生态水文国家野外科学观测研究站 中国水利水电科学研究院, 北京 100038)

摘要: [目的] 探讨土壤水蚀对希拉穆仁草原克氏针茅斑块分布格局的影响机制, 为该区域的水土流失治理提供理论依据。[方法] 采用野外调查和方差均值比率法设定了3个分布格局(聚集分布、均匀分布和随机分布格局)2个对照(不放牧和裸坡), 进行降雨强度为30, 60, 90, 120 mm/h的室内模拟降雨试验, 量化了不同分布格局坡面的产流产沙过程。[结果] ①重度放牧和不放牧为聚集分布格局, 中度放牧为均匀分布格局, 轻度放牧为随机分布格局。②30 mm/h雨强不产流, 60 mm/h雨强产流率呈: 裸坡>聚集分布>随机分布>均匀分布>不放牧; 90 mm/h雨强呈: 裸坡>聚集分布>均匀分布>随机分布>不放牧; 120 mm/h雨强呈: 裸坡>聚集分布>不放牧>均匀分布>随机分布; ③30 mm/h雨强不产沙, 60 mm/h雨强产沙率呈: 裸坡>均匀分布>不放牧>随机分布>聚集分布; 90 mm/h雨强呈: 裸坡>聚集分布>均匀分布>随机分布>不放牧; 120 mm/h雨强呈: 裸坡>不放牧>聚集分布>均匀分布>随机分布; ④120 mm/h雨强随机分布的减沙效益最好, 可减少88.76%, 90 mm/h雨强的不放牧减流效益最好, 可减少45.78%。[结论] 放牧促使克氏针茅出现斑块化的现象, 土壤水蚀加剧了裸地斑块的形成, 进而使克氏针茅斑块出现了不同的分布格局。

关键词: 放牧强度; 植被斑块; 地统计学分析; 土壤水蚀; 减流减沙

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)04-0086-11

中图分类号: S157.1

文献参数: 王子薇, 杨振奇, 郭建英, 等. 土壤水蚀对荒漠草原针茅斑块分布格局形成的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 86-96. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.04.009; Wang Ziwei, Yang Zhenqi, Guo Jianying, et al. Effects of soil water erosion on patch distribution pattern of *Stipa krylovii* in desert steppe [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 86-96.

Effects of Soil Water Erosion on Patch Distribution Pattern of *Stipa Krylovii* in Desert Steppe

Wang Ziwei¹, Yang Zhenqi^{2,3}, Guo Jianying^{2,3}, Tian Tian^{1,2,3}

(1.College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia

Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2.Institute of

Water Resources for Pastoral Area of the Ministry of Water Resources, Hohhot, Inner

Mongolia 010020, China; 3.Yinshanbeilu Grassland Eco-hydrology National Observation and

Research Station, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: [Objective] The influence mechanism of soil water erosion on the patch distribution pattern of *Stipa krylovii* in a Xilamuren grassland was analysed in order to provide a theoretical basis for soil erosion control in this area. [Methods] Three distribution patterns (aggregation, uniform, and random distribution patterns) and two controls patterns (non-grazing and bare slope) were set up by field investigation and the variance mean ratio method. Indoor simulated rainfall experiments with rainfall intensity of 30, 60, 90 mm/h,

收稿日期: 2023-11-27

修回日期: 2024-03-15

资助项目: 国家自然科学基金项目“典型草原区放牧驱动下植被格局与根系对土壤水蚀的影响机制”(42177347); 中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项项目“五大人材”计划项目; 中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项项目“草丛斑块格局对放牧草地坡面水力侵蚀过程的影响机制”(MK2022J11)

第一作者: 王子薇(1998—), 女(汉族), 内蒙古自治区包头市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。Email: 895708838@qq.com.

通信作者: 郭建英(1979—), 男(汉族), 内蒙古自治区清水河县人, 正高级工程师, 博士, 主要从事干旱、半干旱地区水土保持研究工作。Email: guojianying1980@163.com.

and 120 mm/h were conducted to quantify the sediment production and abortion processes on slopes with different distribution patterns. [Results] ① The distribution pattern of heavy grazing and no grazing was aggregation distribution pattern, the distribution pattern of moderate grazing was uniform distribution pattern, and the distribution pattern of light grazing was random distribution pattern. ② At 30 mm/h rainfall intensity, no runoff was produced, whereas at 60 mm/h rainfall intensity the runoff yield was in the order of bare slope > aggregation distribution pattern > random distribution pattern > uniform distribution pattern > no grazing. For the rainfall intensity at 90 mm/h, the runoff yield was in the order of bare slope > aggregate distribution pattern > uniform distribution pattern > random distribution pattern > no grazing. At 120 mm/h rainfall intensity, the runoff yield showed the order of bare slope > aggregation distribution pattern > no grazing > uniform distribution pattern > random distribution pattern. ③ At 30 mm/h, there was no sediment production. However, at 60 mm/h the sediment production rate was in the order of bare slope > uniform distribution pattern > no grazing > random distribution pattern > aggregation distribution pattern. The rainfall intensity at 90 mm/h resulted in sediment distribution in the order of bare slope > aggregate distribution pattern > uniform distribution pattern > random distribution pattern > no grazing. Furthermore, at 120 mm/h rainfall intensity, the sediment distribution was in the order of bare slope > no grazing > aggregate distribution pattern > uniform distribution pattern > random distribution pattern. ④ At 120 mm/h rainfall intensity, the sediment reduction benefit of the random distribution pattern can be reduced by 88.76%, whereas at 90 mm/h rain intensity the flow reduction benefit of the non-grazing pattern can be reduced by 45.78%. [Conclusion] Grazing promoted the patching phenomenon of *S. Krylovii*, and soil water erosion intensified the formation of bare patches, which led to different distribution patterns of *S. krylovii* patches.

Keywords: grazing intensity; vegetation patches; geostatistical analysis; soil water erosion; flow and sediment reduction

土壤侵蚀作为一个世界范围内的重要问题,具有时空普遍性的特点是导致全球干旱、半干旱地区退化和土壤碳流失的重要过程^[1-3]。土壤侵蚀会破坏土地资源、影响土壤肥力和全球碳循环等,对生态的可持续发展产生了较大的威胁,已成为全球重要的生态环境问题之一,并且全球约80%的土壤侵蚀发生在草地^[4-5]。在中国草原面积为 4.0×10^8 hm²,占国土面积的41%,是耕地面积的3.3倍,森林面积的3倍^[6]。

降雨是影响土壤侵蚀的直接因素,人们一致认为植被对拦截径流和泥沙有显著成效,是控制土壤侵蚀的关键策略之一。植被对土壤侵蚀的影响是近年来研究的热点,根据结果表明,与裸坡相比有植被覆盖可以减少50%的地表径流和90%以上的土壤侵蚀^[7]。植被通过增加地表粗糙度和土壤入渗的方式拦截径流,降低径流流速,调节径流和泥沙的流失^[8-9]。与灌丛和林地相比,草地对泥沙的控制效果最好,在降雨期间,草地通过影响初始产流时间增加降雨和土壤入渗的初始损失来改变径流和沉降的过程^[10]。降雨强度和坡度也是影响草原径流泥沙的主要决策因子,降雨对土壤侵蚀的影响是由雨滴击溅和径流引起的土壤分离,导流和沉积的复杂现象,土壤颗粒会随径流而迁移。并且叶片凋落物直接覆盖地

表,同样具有拦截降雨,减少降雨侵蚀的作用。另一方面,它还可以降低径流率,增加土壤入渗,减少土壤飞溅侵蚀^[11-12]。草原减少径流和泥沙的能力随降雨强度的增大而降低,但随着植被覆盖的增加而增加,并且在植被覆盖度为40%时是影响土壤侵蚀的临界值^[13-14]。植被格局也对土壤侵蚀有直接的影响,其空间分布格局直接影响土壤侵蚀的连续性,导致水流的分散从而影响径流和输沙路径的连通性^[15-16]。因此,草本植物是半干旱地区实现水土流失控制和水土保持相结合目标的更好选择。

当前草地退化问题在全世界范围内都表现严重,20世纪60年代以来由于人口增长、畜牧业的快速发展,内蒙古草原一直遭受多重生态问题的困扰,如水土流失,草地功能下降等,其中90%的草原出现不同程度的退化^[10]。而希拉穆仁草原位于阴山北麓属典型荒漠草原,是草原向荒漠的过渡带^[17]。该区域短历时强降雨,季风强劲,土壤侵蚀严重,导致该地区生态环境脆弱。加之草原植被结构简单、结构稳定性差,容易遭受破坏^[18]。随着旅游事业的发展,希拉穆仁草原的景观破碎度逐渐增加,斑块数量逐年增长,并且植被呈微斑块分布,不同利用方式下的草地景观

格局也存在显著差异^[19-20]。为此,本研究以希拉穆仁草原为研究对象,分析不同放牧强度下的克氏针茅斑块分布格局,探究土壤水蚀对克氏针茅斑块形成的影响机制,以期草原地区的水土保持提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

希拉穆仁草原(111°00′—111°20′E, 41°12′—41°31′N)位于内蒙古自治区包头市的达茂旗希拉穆仁镇,希拉穆仁草原位于大青山北部,地形起伏较大,北部地势较高,向南部逐渐降低。由于地理位置的特殊性,地貌多以浑圆的地上丘陵为主,平均高程在 1 642 m 左右,属于低山丘陵草原。该地区为温带半干旱大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,夏季温凉短促,春秋干旱多风。年平均气温约为 2.5 °C,多年平均日照时数达到 3 100 h,无霜期大致有 83 d,全年降水量少,年平均降雨量约为 281 mm,年平均风速约为 4.5 m/s。土壤类型主要是栗钙土、草甸土,同时由于地形、水分等原因形成的风沙土等。本区域植被以旱生和中旱生类植物为主,优势种植物克氏针茅(*Stipa krylovii*)其他主要植物种包括糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、羊草(*Leymus chinensis*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、银灰旋花(*Convolvulus ammamii*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 植被调查 放牧试验小区位于内蒙古包头市达尔罕茂明安联合旗希拉穆仁镇。于 2018 年 7 月下旬参照家庭牧场草地放牧强度分级标准《GB/T 34754—2017》,采用样线法对草地的植被物种组成、牧草产量、枯落物数量、土壤粗粒及地表土壤风蚀、水蚀情况进行调查分析,将放牧地划分为重度放牧〔6 只羊,放牧强度 4.5 羊/(hm²·月)〕、中度放牧〔4 只羊,放牧强度,3.0 羊/(hm²·月)〕、轻度放牧〔2 只羊,放牧强度,1.5 羊/(hm²·月)〕和不放牧〔0 羊/(hm²·月)〕,所用羊只均为体型接近的成年绵羊。

野外植被调查于 2019—2023 年每年植被生长季 6—8 月时采取样线法在希拉穆仁草原放牧样地进行观测,使用 1 m×1 m 样方框测算植被盖度,每种植物记录株数及随机选取 3 株测量株高和丛茎,将所调查的植物齐地剪下带回实验室烘干称重。

为了更准确地地区分坡面植被斑块格局,本研究采用方差均值比率法结合野外实地调查的方法确定了

金马鞍不同放牧强度的 3 种典型自然植被斑块分布格局,即聚集分布($S^2/M > 1$)、均匀分布($S^2/M = 0$)、随机分布($S^2/M = 1$)。

方差均值比率法的计算公式为^[21]:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - m)^2}{N - 1} \quad (1)$$

$$m = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N} \quad (2)$$

式中: S^2 为方差; N 为小样方数; X_i 为第*i*个小样方内的个体数; m 为均值。计算得出重度放牧和不放牧为聚集分布,中度放牧为均匀分布格局,轻度放牧为随机分布格局。

1.2.2 人工模拟降雨试验 本次试验采取室内模拟的形式于 2022—2023 年每年 7—9 月进行如图 1 所示,使用规格为 2 m×0.5 m×0.5 m 的试验槽进行试验,试验槽设有集沙口和收集径流泥沙的设备,可调节坡度范围为 0~25°,本次试验的坡度为 10°。为保证试验土壤与野外土壤的一致性,在试验槽内最底层 40—50 cm 处铺一层细沙,15—40 cm 使用野外土壤进行填充,表层土壤则采用规格为长宽高 0.5 m×0.35 m×0.15 m 的矩形取土槽,按每个放牧强度根据植被调查的分布结果放入试验槽中并且设置裸坡对照。每组试验均保证相似的人工降雨模拟试验采用下喷式人工模拟降雨器进行,每组试验重复 2 次,保证降雨前土壤水分的一致性。降雨强度依据当地降雨情况划分为 30,60,90 和 120 mm/h,降雨历时 60 min,降雨过程中采用高锰酸钾观测径流形态记录径流流速,降雨前 30 min 每 2 min 取一次径流泥沙样,后 30 min 每 5 min 取一次径流泥沙样;径流量均采用不锈钢桶收集,取样前测量径流桶内的高度,搅匀后取样 250 ml;收集每一场模拟降雨的泥沙,将径流样进行过滤。

(1) 减流效益(RRB,%)是反映植被覆盖对坡面径流量减少程度的重要评价指标。

$$RRB = (R_0 - R_1) / R_0 \times 100\% \quad (3)$$

(2) 减沙效益(SRB,%)是反映植被覆盖对坡面泥沙量减少程度的重要评价指标。

$$SRB = (S_0 - S_1) / S_0 \times 100\% \quad (4)$$

式中:RRB 为减流效益;SRB 为减少效益; E_R 为用水减沙比; R_0 为裸坡径流量; R_1 为有植被覆盖坡面径流量; S_0 为裸坡产沙量; S_1 为裸坡有植被覆盖坡面产沙量。



a 模拟降雨



b 采样

图 1 人工模拟降雨试验

Fig.1 Test of artificial simulated rainfall

1.2.3 数据处理

(1) 半变异函数。以区域化变量为基础,变异函数为工具研究分布与空间并呈现一定随机性和结构性的自然现象。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (5)$$

式中: $\gamma(h)$ 为半方差函数值; h 为分离距离; $N(h)$ 为 x 轴间隔距离 h 的点的对数; $Z(x_i), Z(x_i+h)$ 分别是点 x_i 和 (x_i+h) 位置的样本测量值; h 是 2 个分隔样点的距离。

(2) 土壤流失量(S)。指降雨时单位面积的土壤流失情况。

$$S = C_s / A \quad (6)$$

式中: S 为土壤流失量; C_s 为降雨累计泥沙量; A 为坡面的表面积

运用 GS+ 软件对植被斑块分布进行半变异函数分析得到不同放牧强度下的空间格局,并通过 Excel 对数据进行基本统计分析,通过 SPSS 26 对数据进行相关性和显著性分析,利用 Origin 2021 进行图形处理。

2 结果与分析

2.1 不同放牧强度的克氏针茅斑块空间分布格局

克氏针茅斑块格局的空间分布类型如表 1 所示。根据拟合模型的 R^2 可以看出拟合结果具有较高的可信度,其中块金值(C_0)、基台值(C_0+C)和变程(a)决定了半方差函数的形状和结构。块金值 C_0 表示变量的随机程度,重度放牧的克氏针茅株数受随机因素影响的程度最小,中度放牧的最大;基台值(C_0+C)表明变量的变化幅度大小,基台值越大表明变化幅度越大,不放牧的变异程度最剧烈,而轻度放牧的最小;从空间结构比率 $C/(C_0+C)$ 看,各放牧强度均小于 25% 说明各放牧强度有着强烈的空间自相关性;变程 a 表示空间自相关的距离范围,在此距离外则表示不存在空间自相关,重度放牧的变程 4.88 m、中度放牧和轻度放牧的变程 5.3 m、不放牧的变程 4.56 m,说明在此距离内的克氏针茅数量具有明显的空间依赖性,存在一定的相关关系并且随着距离的增加而减小。不放牧的变程最短,轻度放牧和中度放牧的变程最大,说明放牧影响了克氏针茅数量的空间自相关能力,适度放牧可以增加克氏针茅数量的空间自相关距离。

表 1 不同放牧强度克氏针茅株数的变异函数参数及空间分布型

Table 1 Variation function parameters and spatial distribution patterns of *Stipa krylovii* number under different grazing intensities

类别	最优模型	块金值(C_0)	基台值(C_0+C)	空间结构比率 $C/(C_0+C)/\%$	相关系数 (R^2)	变程(a)	分布型
重度放牧	球状模型	13.70	64.67	0.79	0.89	4.88	聚集分布
中度放牧	线性模型	45.37	65.81	0.37	0.81	5.30	均匀分布
轻度放牧	线性模型	18.48	30.33	0.39	0.98	5.30	随机分布
不放牧	指数模型	25.90	227.00	0.89	0.92	4.56	聚集分布

Krging 差值法对不同放牧强度进行地统计学分析的结果如图 2 所示。

由图 2 可知,不同放牧强度存在较强的空间异质性,呈斑块状分布。重度放牧的最高值区域出现在坡

中偏上以及坡下 57.3~62.4,最低值在坡中及坡上出现,数值为 31.8~42.0;中度放牧的低值出现在坡下 36.3~41.1,高值出现在坡上 43.5~50.7,说明中度放牧的克氏针茅数量自坡上至坡下逐渐减少;轻度放牧

与中度放牧呈相反的分布状态,并且坡中克氏针茅斑块化最明显;不放牧的克氏针茅斑块破碎程度最高,数量分布最高值出现在坡上 47.1~69.2,低值出现在坡中偏下 16.2~33.9。

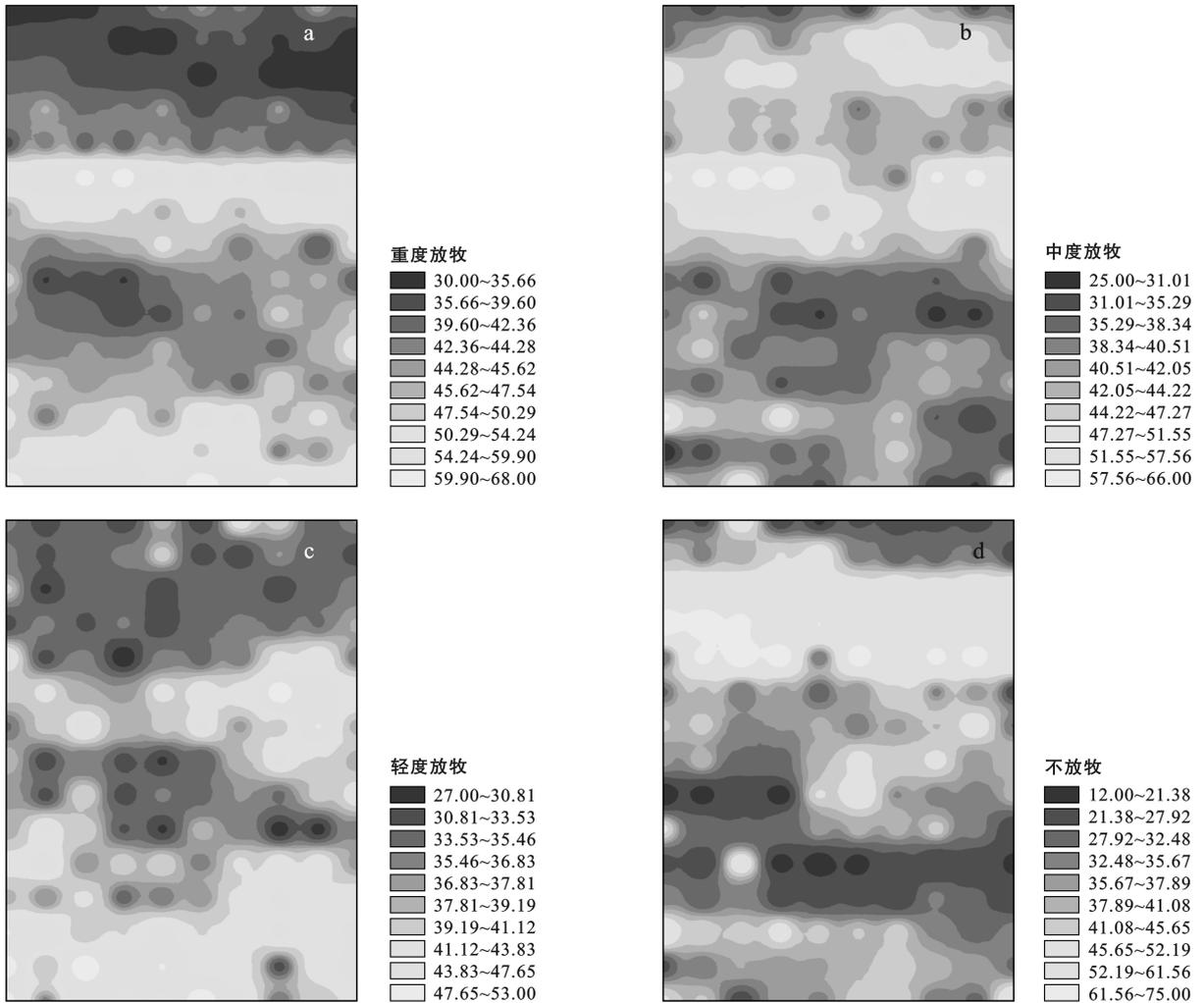


图 2 不同放牧强度的空间插值模拟图

Fig.2 Spatial interpolation simulation of different grazing intensity

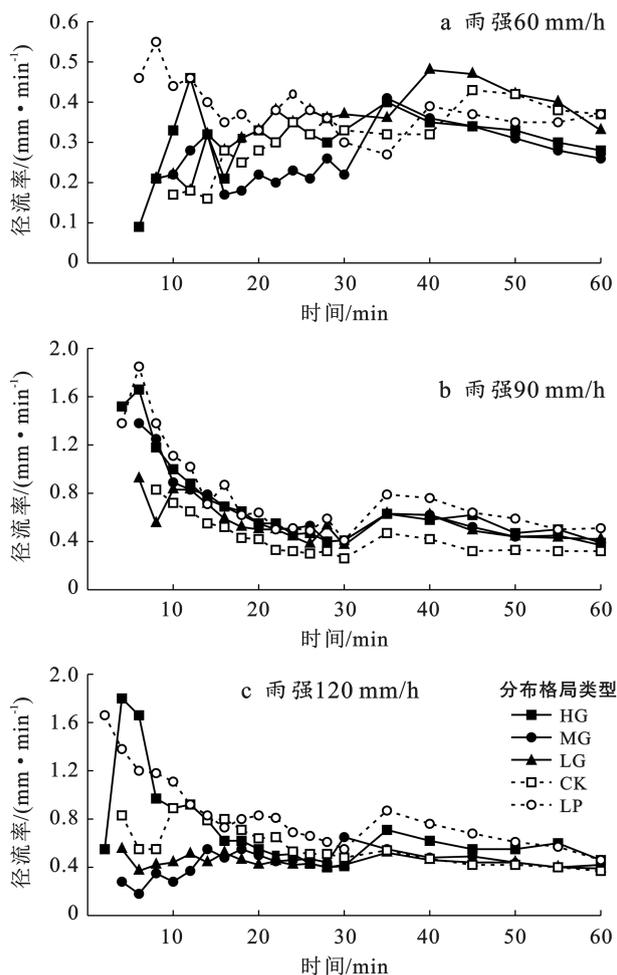
2.2 不同克氏针茅斑块空间分布格局的产流产沙特征分析

不同克氏针茅斑块分布格局改变了径流的产生时间,但 30 mm/h 雨强并未产生径流。由图 3 可知 60,90 和 120 mm/h 雨强下裸坡的产流时间在降雨开始后的 6,4 和 2 min。相比之下,小雨强且有植被覆盖的坡面显然延长了径流的初始产流时间,随降雨强度的增强呈逐渐加快的趋势。由时间的增加可以看出产流率均呈逐渐稳定的趋势。此外,60 mm/h 雨强,不放牧样地径流过程的变异系数 < 35% 呈中等变异,裸坡,聚集分布,均匀分布,随机分布格局径流过程的变异系数均 > 35% 呈高度变异。60 mm/h 雨强下有植被覆盖时各分布格局坡面的产流峰值分别

是 24,25,26 和 28 min,裸坡的产流峰值出现在 22 min。90 和 120 mm/h 裸坡和各分布格局径流过程的变异系数均 > 35% 呈高度变异。各雨强下不同分布格局的径流率也各有不同,60 mm/h 雨强产流率呈:裸坡 > 聚集分布 > 随机分布 > 均匀分布 > 不放牧;90 mm/h 雨强呈:裸坡 > 聚集分布 > 均匀分布 > 随机分布 > 不放牧;120 mm/h 雨强呈:裸坡 > 聚集分布 > 不放牧 > 均匀分布 > 随机分布。

同样,不同克氏针茅斑块分布格局的产沙过程也不相同。由图 4 可知 60 mm/h 雨强产沙率呈:裸坡 > 均匀分布 > 不放牧 > 随机分布 > 聚集分布;90 mm/h 雨强呈:裸坡 > 聚集分布 > 均匀分布 > 随机分布 > 不放牧;120 mm/h 雨强呈:裸坡 > 不放牧 > 聚集分布 >

均匀分布>随机分布。与裸坡相比,不同植被分布格局的产沙过程较为稳定,呈逐渐减少的趋势。60 mm/h 雨强不同分布格局的产沙率在 20 min 后趋于稳定;90 mm/h 雨强不同分布格局在 18 min 后趋于稳定,而 120 mm/h 雨强不同分布格局在 12 min 后呈稳定状态。60 mm/h 雨强,聚集分布,均匀分布和裸坡的变异系数<35%呈中等变异,随机分布和不放牧>35%呈高度变异;90 mm/h 雨强,聚集分布,不放牧和裸坡的变异系数<35%呈中等变异,均匀分布和随机分布的变异系数<15%呈小变异;120 mm/h 雨强,聚集分布、随机分布、不放牧和裸坡的变异系数<35%呈中等变异,均匀分布的变异系数>35%呈高度变异。



注:HG 为聚集分布, MG 为均匀分布, LG 为随机分布, CK 为不放牧, LP 为裸坡。下同。

图 3 不同分布格局坡面的产流过程

Fig.3 Runoff process of slope with different distribution patterns

不同分布格局的坡面产流量与产沙量之间存在线性关系,如图 5 所示,60,90 和 120 mm/h 雨强下聚集分布、均匀分布、随机分布、不放牧和裸坡坡面径流

量和泥沙量均存在显著正相关关系。这表明在降雨情况下泥沙量随降雨量的增加而增加。根据斜率可以看出,水蚀具有不稳定性。

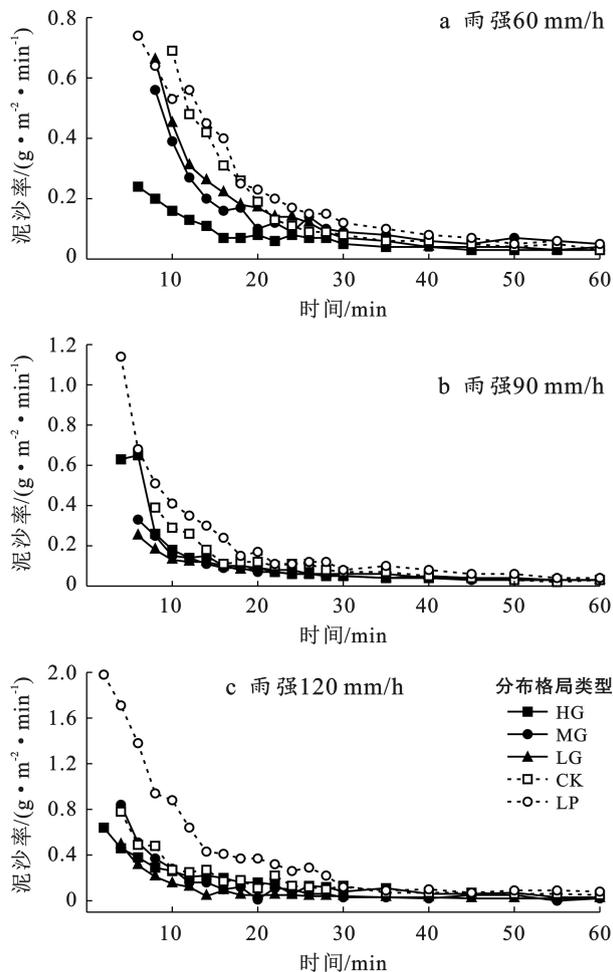
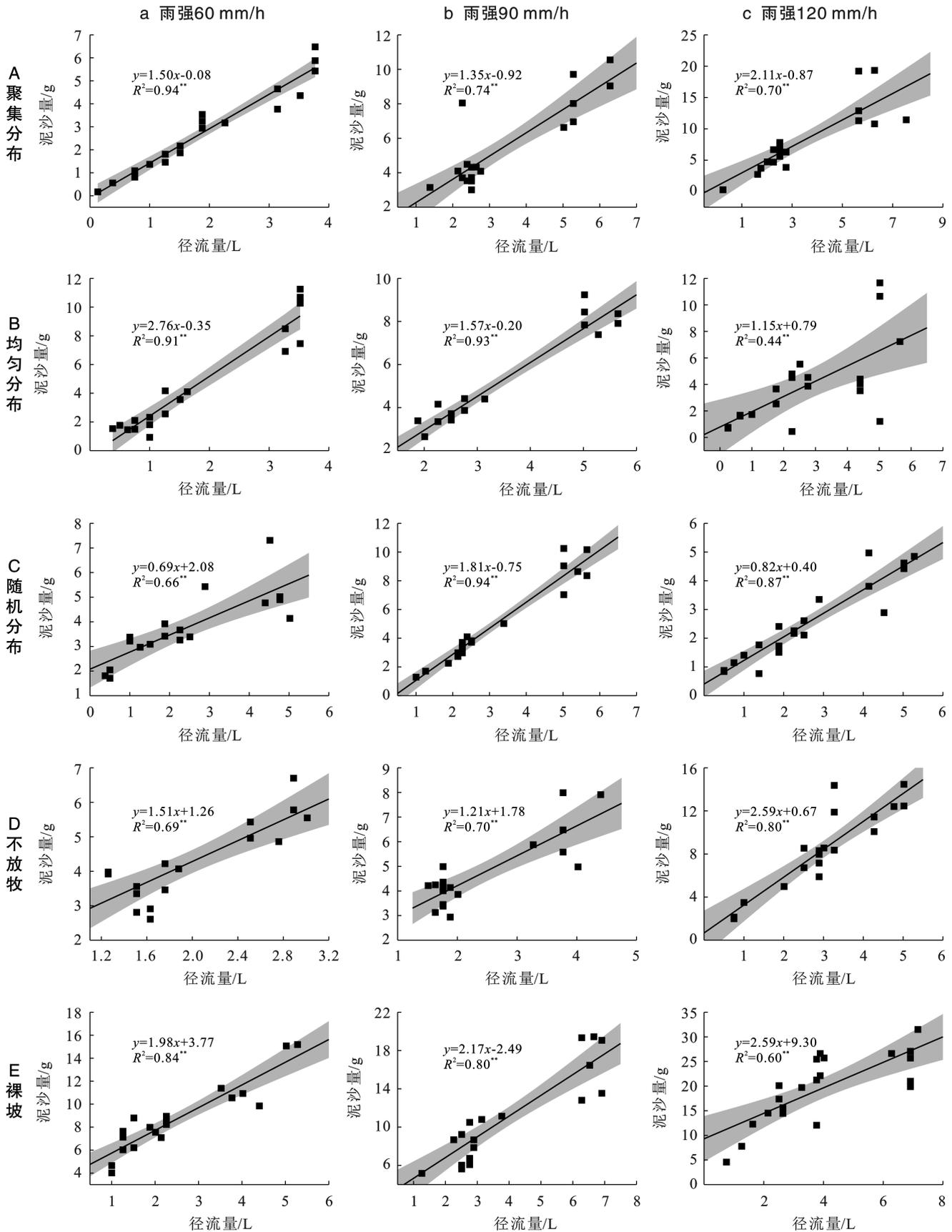


图 4 不同放牧强度坡面的泥沙过程

Fig.4 Sediment process on slope with different grazing intensities

2.3 不同克氏针茅斑块分布格局对坡面减流率和减沙率的影响

从图 6 可以看出,60 mm/h 雨强下的不同分布格局的减流率在 9%~34%之间,整体来看坡面累积径流量的减小幅度呈:不放牧>均匀分布>随机分布>聚集分布,90 mm/h 雨强下的不同分布格局减流率在 12%~42%之间,较 60 mm/h 雨强略有增加,坡面累积径流量的减小幅度呈:裸坡>随机分布>均匀分布>聚集分布,120 mm/h 雨强下的不同放牧强度减流率在 14%~38%之间,减小幅度呈:均匀分布>随机分布>不放牧>聚集分布。表明径流总量的减小幅度在各雨强下均为聚集分布的最大。且从不同分布格局的对比中可以看出 90 mm/h 雨强下的不放牧减流率为 42.72%效果最好,60 mm/h 雨强的聚集分布减流率为 9.47,减流效果最差。



注：* * 表示在 0.01 水平显著相关，图中阴影部分为 95% 的置信区间。

图 5 不同放牧强度产流量和产沙量的关系

Fig.5 Relationship between runoff and sediment yield under different grazing intensities

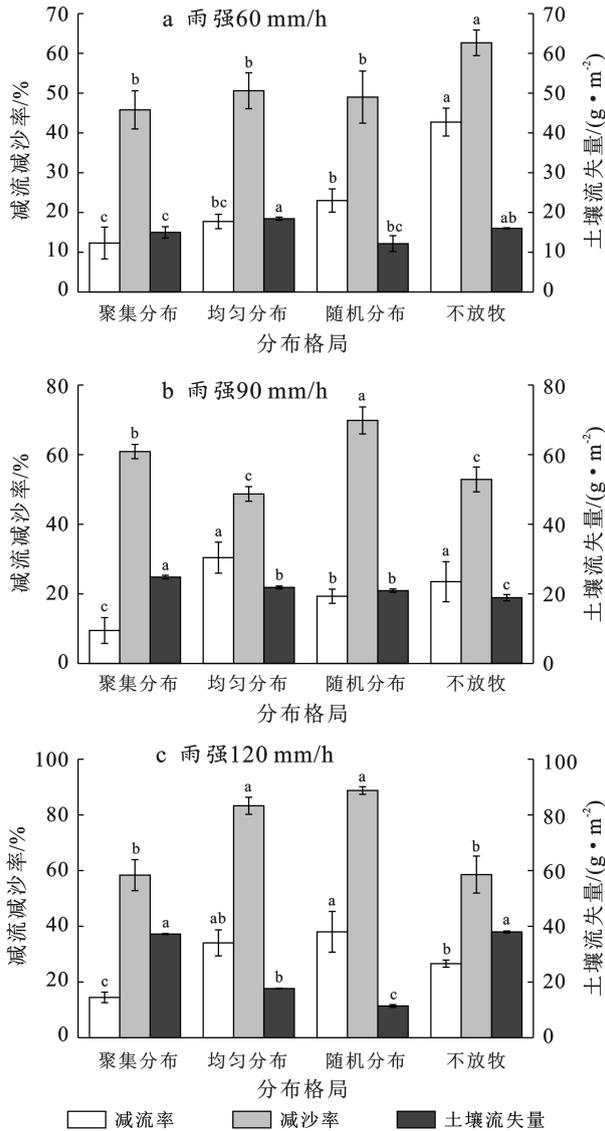


图 6 不同降雨强度下的减流减沙率
Fig.6 Flow and sediment reduction rate under different rainfall intensity

60 mm/h 雨强的减沙量在 48%~69%, 表现为: 聚集分布>随机分布>均匀分布>不放牧, 90 mm/h 雨强的减沙量在 45%~62%, 总体减沙率差异不大, 呈: 不放牧>均匀分布>随机分布>聚集分布, 120 mm/h 雨强的减沙量在 58%~88%, 表现为: 随机分布>均匀分布>不放牧>聚集分布。表明在大雨强下不放牧的坡面减沙效果最好, 小雨强的减沙率范围较大。整体来看, 不同分布格局的产沙量 120 mm/h 雨强的随机分布减沙效果最好, 减沙率为 88.76%, 90 mm/h 雨强的聚集分布减沙最差, 减沙率为 45.78%。且不同雨强, 不同分布格局的减沙率均高于减流率。

60 mm/h 时土壤流失量呈: 裸坡>均匀分布>不放牧>聚集分布>随机分布; 90 mm/h 时呈: 裸坡

>聚集分布>均匀分布>随机分布>不放牧; 120 mm/h 时呈: 裸坡>不放牧>聚集分布>均匀分布>随机分布。裸坡在 120 mm/h 时土壤流失量最大, 随机分布最小。

由表 2 可知, 不同分布格局的坡面累积径流量、产沙量和土壤流失量存在显著差异, 裸坡的径流量、产沙量和土壤流失量均显著高于其他分布格局, 径流量、产沙量和土壤流失量均随降雨强度的增强而增加。

表 2 不同降雨强度的减流减沙效益
Table 2 Benefits of runoff and sediment reduction under different rainfall intensities

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	减流减沙效益		
	径流量/L	产沙量/g	土壤流失量/ (g·m ⁻²)
60	47.70±4.18 ^c	74.16±7.93 ^c	16.48±1.77 ^c
90	58.85±5.85 ^b	92.28±5.78 ^b	22.81±1.40 ^b
120	70.88±5.82 ^a	165.88±7.21 ^a	36.88±1.56 ^a

注: 数据为平均值±标准差; 同列不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($p < 0.05$)。

3 讨论

3.1 不同放牧强度的植被斑块分布格局特征

在景观中, 植被斑块状出现是景观破碎的表现, 放牧是影响植被斑块空间分布格局的重要因素, 研究表明过度放牧会导致草地生态系统瓦解, 植被退化严重, 斑块格局破碎等现象^[22]。Kéfi S 等^[23]在西班牙、希腊和摩洛哥的研究结果表明, 放牧强度增强时会使植被斑块空间分布规律发生改变, 斑块破碎或消失与本文的研究结果基本一致。本研究表明重度放牧为聚集分布格局, 这与王宇^[24]在四子王旗的研究结果, 随放牧强度的增加草地斑块的均匀度增加, 重度放牧为均匀分布格局的研究结果不一致。其原因在于家畜的选择性采食、践踏及家畜粪便分布不同导致的不一样的结果。在研究中发现羊群属群居动物, 在放牧的过程中往往聚集在坡上或者坡下且存在边缘效应。一般边缘的斑块化程度高于中间部分, 本试验样地存在建设过程中产生的车辙印记, 从研究结果来看, 经过 5 a 的生境恢复对植被斑块的空间分布格局的影响并没有消除。研究发现放牧导致克氏针茅群落和种群出现斑块化且呈植物株丛小型化^[25]。根据不同放牧强度的 Kriging 空间分布插值结果显示重度放牧和轻度放牧呈坡中和坡上植被数量较少, 中度放牧和不放牧则相反呈坡上的植被数量较多。这种情况出现的原因是放牧的不确定性。王梓晗等^[26]结果表明冷蒿在轻度放牧的空间自相关距离较大与本文的

研究结果一致。半方差函数结合地理信息系统软件研究不同放牧强度下草原植被的景观格局特征,更直观地反映了克氏针茅的斑块化和破碎程度。

3.2 土壤水蚀对斑块空间分布格局的影响

耿林昇^[27]的研究结果表明,随放牧强度的增强土壤达到稳渗的时间逐渐缩短,土壤粒径也逐渐变粗。可见本研究区因放牧导致了不同的土壤环境,因此土壤侵蚀情况也不相同,而植被覆盖对地表径流泥沙具有明显拦截作用^[28]。不同放牧强度导致了不同的植被覆盖情况形成了不同的植被分布格局。植被的结构影响降雨再分配,从而减少雨滴对坡面土壤的击溅作用,减少雨滴动能^[29]。通过室内人工模拟降雨试验对不同植被分布格局的坡面进行探究发现相同降雨强度的不同植被分布格局初始产流时间不相同,表现为:裸坡<聚集分布<均匀分布<随机分布<不放牧,表明聚集分布坡面的初始产流时间最短,过度放牧使坡面植被减少,土壤抗蚀性变弱^[30]。王则宇^[31]的研究结果表明,克氏针茅群落的土壤水分下渗分布相对均匀,而放牧使土壤质地发生改变的同时进而也改变了植被的分布格局。本研究探讨了不同分布格局和不同降雨强度下坡面水力侵蚀的情况,结果表明 120 mm/h 降雨时,随机分布可减少 88.76% 的泥沙。从“源—汇”的观点来看,裸地斑块为径流泥沙的“源”,植被为“汇”,裸露斑块和植被斑块的分布格局影响地表径流的汇集和挟沙能力,进而改变水土流失过程的连续性^[32]。聚集分布格局的裸露地表分布面积广,形成了一条完整通路;均匀分布和随机分布格局的植被覆盖相对均匀,通路形成受阻使坡面泥沙减少,所以不同分布格局的总产沙量也不相同。并且总产沙量也随降雨强度的增强而增加,但不放牧的总产沙量仅次于裸坡的产沙量,随机分布的总产沙量最小。径流泥沙的相关分析可知,在各个雨强下的随机分布、均匀分布、聚集分布、不放牧和裸坡的径流和泥沙量呈显著正相关,泥沙量随径流量的增加而增加,但变化幅度各有不同是由于聚集分布样地的土壤容重显著高于其他样地所以聚集分布的土壤紧实度越高,不放牧的土壤容重最小,说明土壤越松,这与杨雅楠等^[33]的研究结果一致。土壤的侵蚀强度大小与空间变化取决于放牧强度、斑块格局等因素的组合影响^[34-35]。而土壤养分又是植物生长的重要因素,因此使植被的分布出现差异。从研究结果来看放牧促使克氏针茅出现斑块化的现象,而土壤水蚀使土壤养分流失进而加剧了斑块化的形成,可见水蚀对草地生态系统具有重要的影响。

4 结论

(1) 放牧使克氏针茅出现斑块化,不同放牧强度影响克氏针茅斑块的空间分布格局,根据方差均值比率法和半变异函数分析可知重度放牧和不放牧呈聚集分布格局,中度放牧呈均匀分布格局,轻度放牧呈随机分布格局。

(2) 30 mm/h 雨强不产流,60 mm/h 雨强产流不放牧的产流量最小,聚集分布的产沙率最小;90 mm/h 雨强不放牧的产流量和产沙量均最小;120 mm/h 雨强随机分布的产流产沙量均最小。

(3) 植被覆盖可以有效减少坡面的产流产沙,120 mm/h 雨强随机分布的减沙效益最好可减少 88.76%,90 mm/h 雨强的不放牧减流效益最好可减少 45.78%;土壤流失量各雨强均有不同但 120 mm/h 雨强时最大。

(4) 放牧促使克氏针茅出现斑块化的现象,土壤水蚀加剧了裸地斑块的形成,进而使克氏针茅斑块出现了不同的分布格局。

参考文献 (References)

- [1] Mendez M J, Buschiazzo D E. Soil coverage evolution and wind erosion risk on summer crops under contrasting tillage systems [J]. *Aeolian Research*, 2015, 16: 117-124.
- [2] Feng Tianjiao, Wei Wei, Chen Liding, et al. Assessment of the impact of different vegetation patterns on soil erosion processes on semiarid loess slopes [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, 43: 1860-1870.
- [3] Seitz S, Goebes P, Puerta V L, et al. Conservation tillage and organic farming reduce soil erosion [J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2018, 39(1): 4.
- [4] 颜世敏, 马阔. 土壤侵蚀影响因素及其危害分析 [J]. *江西农业*, 2019(6): 67.
Yan Shimin, Ma Kuo. Influencing factors of soil erosion and its harm analysis [J]. *Jiangxi Agriculture*, 2019 (6): 67.
- [5] 陈朝良, 赵广举, 穆兴民, 等. 基于 RUSLE 模型的湟水流域土壤侵蚀时空变化 [J]. *水土保持学报*, 2021, 35(4): 73-79.
Chen Chaoliang, Zhao Guangju, Mu Xingmin, et al. Spatial-temporal change of soil erosion in Huangshui watershed based on RUSLE model [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(4): 73-79.
- [6] 张新时, 唐海萍, 董孝斌, 等. 中国草原的困境及其转型 [J]. *科学通报*, 2016, 61(2): 165-177.
Zhang Xinshi, Tang Haiping, Dong Xiaobin, et al. The dilemma of steppe and its transformation in China [J].

- Chinese Science Bulletin, 2016, 61(2):165-177.
- [7] Zhang Xia, Li Peng, Zhan Bin li, et al. Effects of precipitation and different distributions of grass strips on runoff and sediment in the loess convex hillslope [J]. CATENA, 2018, 162:130-140.
- [8] Wang Bing, Zhang Guanghui. Quantifying the binding and bonding effects of plant roots on soil detachment by overland flow in 10 typical grasslands on the Loess Plateau [J]. Soil Science Society of America Journal, 2017, 81(6):1567.
- [9] Zhou Zhengchao, Shangguan Zhouping. The effects of ryegrass roots and shoots on loess erosion under simulated rainfall [J]. CATENA, 2007, 70(3):350-355.
- [10] Shi Peng, Li Peng, Li Zhanbin, et al. Effects of grass vegetation coverage and position on runoff and sediment yields on the slope of Loess Plateau, China [J]. Agricultural Water Management, 2022, 259:107231.
- [11] Sun Jiamei, Fan Dengxing, Yu Xinxiao, et al. Hydraulic characteristics of varying slope gradients, rainfall intensities and litter cover on vegetated slopes [J]. Hydrology Research, 2018, 49:506-516.
- [12] Xia Lu, Song Xiaoyu, Fu Na, et al. Effects of forest litter cover on hydrological response of hillslopes in the Loess Plateau of China [J]. Catena, 2019, 181:104076.
- [13] Hou Guirong, Bi Huaxing, Huo Yunmei, et al. Determining the optimal vegetation coverage for controlling soil erosion in *Cynodon dactylon* grassland in North China [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 244:118771.
- [14] 丛月, 张洪江, 程金花, 等. 华北土石山区草本植被覆盖度对降雨溅蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(5):59-62.
- Cong Yue, Zhang Hongjiang, Cheng Jinhua, et al. Effects of herbaceous plant coverage rate on rainfall splash in rocky mountain area of Northern China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(5):59-62.
- [15] Wang Dongdong, Yuan Zaijian, Cai Yitong, et al. Characterisation of soil erosion and overland flow on vegetation-growing slopes in fragile ecological regions: A review [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 285:112165.
- [16] Zhao Xining, Wu Pute, Chen Xiaoli, et al. Runoff and sediment yield under simulated rainfall on hillslopes in the Loess Plateau of China [J]. Soil Research, 2013, 51(1):50.
- [17] 耿林昇, 李红丽, 董智, 等. 放牧对希拉穆仁草原土壤粒度特征的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(12):121-126.
- Geng Linsheng, Li Hongli, Dong Zhi, et al. Distribution characteristics of soil particle size in Xilamuren grassland with different grazing intensities [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(12):121-126.
- [18] 魏亚娟, 刘美英, 解云虎, 等. 希拉穆仁荒漠草原围封区植物群落土壤有机碳研究[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1):35-43.
- Wei Yajuan, Liu Meiyong, Xie Yunhu, et al. Study on soil organic carbon of plant communities in enclosed area of Xilamuren Desert grassland [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1):35-43.
- [19] 白一杰, 蒙仲举, 吕新丰. 人类活动干扰下希拉穆仁草原景观格局的演变[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2022, 43(4):32-40.
- Bai Yijie, Meng Zhongju, Lyu Xinfeng. Evolution of landscape type in Xilamuren grassland under the disturbance of human activities [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2022, 43(4):32-40.
- [20] 刘燕. 不同利用方式对荒漠草原景观格局与土壤空间异质性的影响[D]. 内蒙古 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- Liu Yan. Effects of different land use patterns on landscape pattern and soil spatial heterogeneity in desert steppe [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2023.
- [21] 张鹏, 李龙, 李艳, 等. 植被斑块格局对砒砂岩坡面土壤侵蚀强度的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(5):58-65.
- Zhang Peng, Li Long, Li Yan, et al. Effect of vegetation patch pattern on soil erosion intensity on arsenic sandstone slope [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(5):58-65.
- [22] 宋彦涛, 乌云娜, 张靖, 等. 放牧强度对克氏针茅(*Stipa krylovii*)草原植被景观格局的影响[J]. 中国沙漠, 2016, 36(3):674-680.
- Song Yantao, Wu Yunna, Zhang Jing, et al. Effects of Grazing Intensity on Vegetation Landscape Pattern in *Stipa krylovii* steppe in Inner Mongolia [J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(3):674-680.
- [23] Kéfi S, Rietkerk M, Alados C L, et al. Spatial vegetation patterns and imminent desertification in Mediterranean arid ecosystems [J]. Nature, 2007, 449(7159):213-217.
- [24] 王宇. 基于轻小型无人机的不同放牧梯度下荒漠草原植被特征研究[D]. 内蒙古 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- Wang Yu. Vegetation characteristics of the desert grassland under different grazing gradient based on

- small unmanned aerial vehicle [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.
- [25] 赵登亮,刘钟龄,杨桂霞,等.放牧对克氏针茅草原植物群落与种群格局的影响[J].草业学报,2010,19(3):6-13.
Zhao Dengliang, Liu Zhongling, Yang Guixia, et al. Grazing impact on distribution pattern of the plant communities and populations in *Stipa krylovii* steppe [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2010,19(3):6-13.
- [26] 王梓晗,王忠武,吕世杰,等.载畜率对荒漠草原冷蒿植物种群密度及其空间分布的影响[J].生态学报,2022,42(8):3420-3428.
Wang Zihan, Wang Zhongwu, Lü Shijie, et al. Effects of stocking rate on population density and spatial distribution of *Artemisia frigida* in desert steppe [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(8):3420-3428.
- [27] 耿林昇.放牧强度对希拉穆仁草原土壤入渗与产流产沙的影响[D].山东泰安:山东农业大学,2022.
Geng Linsheng. Effects of Grazing intensity on soil infiltration and runoff sediment production in Xilamuren grassland [D]. Taian, Shandong: Shandong Agricultural University, 2023.
- [28] 田培,毛梦培,潘成忠.植被调控水土流失机制研究进展及展望[J].中国水土保持科学(中英文),2024,22(1):131-140.
Tian Pei, Mao Mengpei, Pan Chengzhong. Research progress and prospect of vegetation control mechanism of soil and water loss [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2024,22(1):131-140.
- [29] 文博瑾,段高辉,温仲明.生物多样性与地形及土壤因素对坡面产流产沙的耦合影响[J].草地学报,2023,31(4):1186-1197.
Wen Bojin, Duan Gaohui, Wen Zhongming. Coupling effects of biodiversity with topographic and soil factors on slope runoff-sediment yield [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023,31(4):1186-1197.
- [30] 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.
- [31] 王则宇.希拉穆仁草原不同植物群落土壤入渗特征及其影响因素[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2018.
Wang Zeyu. Soil Infiltration capacity and its influencing factors of different plant communities in the Xilamuren grassland [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2018.
- [32] 张光辉.从土壤侵蚀角度诠释泥沙连通性[J].水科学进展,2021,32(2):295-308.
Zhang Guanghui. Understanding sediment connectivity from soil erosion perspective [J]. Advances in Water Science, 2021,32(2):295-308.
- [33] 杨雅楠,杨振奇,郭建英.放牧强度对荒漠草原植被、土壤及其侵蚀特征的影响[J].水土保持通报,2022,42(4):66-73.
Yang Yanan, Yang Zhenqi, Guo Jianying. Effects of grazing intensity on features of vegetation, soil and its erosion in a steppe desert [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(4):66-73.
- [34] 郭建英,董智,李锦荣,等.放牧强度对荒漠草原土壤物理性质及其侵蚀产沙的影响[J].中国草地学报,2019,41(3):74-82.
Guo Jianying, Dong Zhi, Li Jinrong, et al. Effects of grazing intensity on soil physical properties and soil erosion and sediment yield in desert steppe [J]. Chinese Journal of Grassland, 2019,41(3):74-82.
- [35] 张尚轩,李龙,朱志卓,等.水力侵蚀下砒砂岩坡面植被格局对土壤颗粒空间分布的影响[J].水土保持通报,2023,43(4):83-94,102.
Zhang Shangxuan, Li Long, Zhu Zhizhuo, et al. Effects of vegetation pattern on spatial distribution of soil particles due to water erosion on an Pisha sandstone slope [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(4):83-94,102.