

# 放牧强度对荒漠草原植被、土壤及其侵蚀特征的影响

杨雅楠<sup>1</sup>, 杨振奇<sup>2,3</sup>, 郭建英<sup>2,3</sup>

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

**摘要:** [目的] 研究不同放牧强度对荒漠草原植被特征、土壤物理性能及其土壤侵蚀的影响, 为荒漠草原水土流失治理和退化及生态系统修复提供科学依据。[方法] 以内蒙古希拉穆仁荒漠草原为研究区, 采用原位监测和模拟试验相结合的方法, 对重度、中度、轻度和无放牧 4 种不同放牧强度样地的植被群落、土壤物理性质、土壤侵蚀过程开展了研究。[结果] ①随着放牧强度的增加, 群落平均盖度、高度和地上生物量呈降低趋势, 物种丰富度指数、多样性指数及均匀度指数整体呈上升趋势。②土壤砂粒含量随放牧强度的增加呈上升趋势, 表层土壤(0—10 cm)容重及入渗性能更易受放牧影响。③相同降雨强度下, 随放牧强度的增加, 土壤的侵蚀产沙量随之增加。土壤初渗速率、Simpson 优势度指数和土壤砂粒含量是影响不同放牧强度下土壤侵蚀特征的关键因素。[结论] 放牧显著影响荒漠草原植被群落特征及土壤水文物理性能, 因此, 建议该区放牧强度控制在中度(2 羊单位/hm<sup>2</sup>)及以下, 对于受重度放牧破坏的草原区, 围栏封育的同时还可适当进行人工补播或利用微生物改良土壤来提升土壤抗蚀性。

**关键词:** 放牧强度; 荒漠草原; 土壤侵蚀; 土壤水文物理特性; 模拟降雨

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)04-0066-08

中图分类号: S812

**文献参数:** 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. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.04.009; 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.

## Effects of Grazing Intensity on Features of Vegetation, Soil and Its Erosion in a Steppe Desert

Yang Yanan<sup>1</sup>, Yang Zhenqi<sup>2,3</sup>, Guo Jianying<sup>2,3</sup>

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

Hohhot, Inner Mongolia 010018, China; 2. Yinshanbeilu National Field Research Station of Steppe

Eco-hydrological System, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

3. Institute of Water Resources for Pastoral Area, Ministry of Water Resources, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of different grazing intensity on vegetation features, soil physical properties, and soil erosion in a steppe desert were determined in order to provide a scientific basis for soil erosion control, degradation and ecosystem restoration in this region. [Methods] The vegetation community, soil physical properties, and soil erosion processes of sample plots under four different grazing intensities (heavy, moderate, light, and no grazing) were studied in the Xilamuren desert steppe of the Inner Mongolia Autonomous Region by use of in-situ monitoring and simulation experiments. [Results] ① Average coverage, height, and aboveground biomass of the vegetation community decreased as grazing intensity increased, while species richness index, diversity index, and evenness index increased. ② Sand content of the soil increased with grazing intensity, and bulk density and infiltration of the surface soil (0—10 cm) were more affected by

收稿日期: 2021-12-08

修回日期: 2022-03-06

资助项目: 中国水利水电科学研究院基本科研业务费专项“放牧影响下草原坡面径流路径演变过程及地表粗理化机制研究”(MK2021J06); 国家自然科学基金项目(42177347; 51879155)

第一作者: 杨雅楠(1996—), 女(汉族), 内蒙古自治区达拉特旗人, 硕士研究生, 研究方向为生态水文。Email: 799823956@qq.com。

通讯作者: 郭建英(1979—), 男(汉族), 内蒙古自治区清水河县人, 博士, 正高级工程师, 主要从事干旱半干旱区水土流失与植物生态方面的研究。Email: guojianying1980@163.com。

grazing. ③ Under the same rainfall intensity, soil erosion and sediment yield increased with increasing grazing intensity. Soil primary infiltration rate, Simpson dominance index, and sand content in the soil were the key factors affecting soil erosion features under different grazing intensity. [Conclusion] Grazing significantly influenced the desert steppe vegetation community characteristics and soil hydro-physical properties. Therefore, grazing intensity should be controlled to moderate intensity (i.e., two sheep units/hm<sup>2</sup>) or below. For steppe regions damaged by heavy grazing, soil erosion resistance can also be increased by soil improvement through the use of appropriate artificial reseeding and introduction of microorganisms.

**Keywords:** grazing intensity; desert steppe; soil erosion; hydro-physical properties of soils; simulated rainfall

内蒙古草原面积占全国草原面积的19.3%<sup>[1]</sup>,是中国生态安全屏障体系中北方防沙带的主体部分,生态战略地位极其重要。然而,荒漠草原作为草原向荒漠过渡的一类十分脆弱的草原生态系统,其生态系统的稳定性较低,抗干扰能力也较弱,干扰后恢复困难甚至不可逆转<sup>[2]</sup>。放牧是草地资源的主要利用方式,研究表明,适度放牧对于草地生态系统具有一定程度的积极影响<sup>[3]</sup>,其原因是牲畜在放牧过程中的采食、践踏和排泄行为能够促进群落演替、维持群落结构、保护物种多样性和土壤养分状况<sup>[4-8]</sup>。也有研究表明,在荒漠草原地区,过度放牧对造成植被退化,土壤裸露并且肥力下降,从而加剧水土流失产生<sup>[9-10]</sup>。荒漠草原区的土壤多以栗钙土类为主,降雨短促而强烈,一旦地表植被被破坏,强降雨将导致严重的水土流失。因此,研究放牧对草原区土壤侵蚀的机理变得尤为重要,目前,国内外对于土壤侵蚀机理的研究主要集中在黄土区、紫色土区和黑土区等区域<sup>[11-15]</sup>,荒漠草原区土壤侵蚀机理方面的研究尚显单薄,从土壤水文物理特性方面入手探讨放牧对侵蚀机理影响的研究还较少。为此,本文以位于荒漠草原区的内蒙古希拉穆仁草原为研究区,建立不同放牧强度原位监测小区,采取原位人工模拟降雨与室内试验相结合的手段,研究放牧对荒漠草原植物群落、土壤水文物理特性和土壤侵蚀特征的影响,以期为荒漠草原区生态系统修复,草地资源可持续利用以及合理放牧制度制定提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验区位于内蒙古包头市达尔罕茂明安联合旗召河镇希拉穆仁草原(图1),地理坐标为41°12′—41°31′N,111°00′—111°20′E。地貌为低缓丘陵,坡度介于3°~5°之间,为温带半干旱大陆性气候,该区多年平均降水量为283 mm,降水主要集中于7—9月。多年平均风速为4.5 m/s,以北风和西北风为主,主要集中于3—5月。试验区地带性土壤为栗钙土,有

效土层平均厚度40 cm,下方存在20—40 cm的钙积层,局部地区基岩裸露。试验区植被群落以克氏针茅(*Stipa krylovii*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)等多年生、旱生草本植物为主。

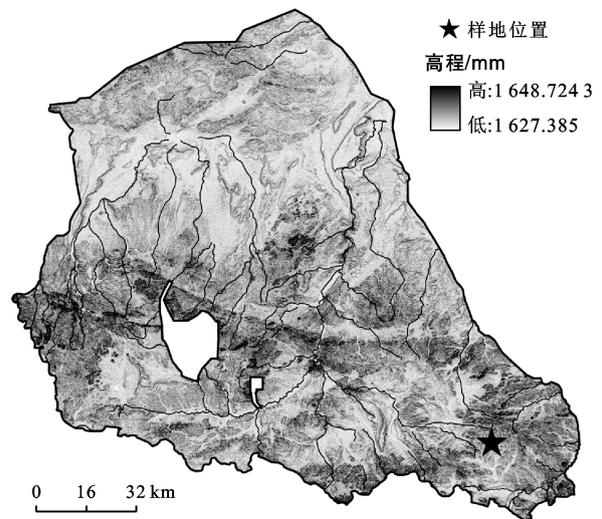


图1 希拉穆仁草原地形及样地位置图

### 1.2 试验设计

1.2.1 样地设置 研究样地依托于内蒙古阴山北麓草原国家生态水文野外科学观测研究站的放牧试验样地,该样地于2017年7月下旬在希拉穆仁草原上选取地势平缓、土壤与植被条件一致的天然草地上建立。建立了轻度、中度、重度和未放牧4个放牧强度的监测小区,每种放牧强度3个重复,每个放牧小区面积为100 m×100 m,其中,对试样地选取的是牧民家2010年起围封的天然草地。放牧强度参考中国农业行业载畜量标准和前人<sup>[16-17]</sup>对内蒙古荒漠草原载畜率的研究结果,并结合研究区实际放牧情况,设定本研究放牧梯度为重度放牧(HG,3羊单位/hm<sup>2</sup>),中度放牧(MG,2羊单位/hm<sup>2</sup>),轻度放牧(LG,1羊单位/hm<sup>2</sup>),无放牧样地(CK,0羊单位/hm<sup>2</sup>)。受研究区气候条件影响,当地牧民实际放牧时间为

5—10月。为确保研究方法的代表性和准确性,与当地牧民采取相同的放牧制度,羊群的采食时间为7:00—19:00,晚间赶回羊圈休息,各小区羊指定后不做更换。

**1.2.2 植被调查** 每个放牧样地内沿垂直等高线方向布设3条固定植被调查样带。研究区植被生长最旺盛季节为每年8月,因此本研究于2021年8月中旬开展植被调查,每条样带设置样方(1 m×1 m)11个,共调查样方数量132个,植被调查时详细记录样方盖度以及测量样方内物种的高度、盖度、多度,并齐地刈割,获取地上生物量,带回实验室于65℃下烘干24 h后称重。植被自然高度用直尺测量,目测植被盖度,记录单位面积植被株数。

**1.2.3 土壤取样** 荒漠草原草本植物根系主要集中在0—30 cm土层深度内,因此本研究取样极限深度设置为40 cm。2021年8月中旬,土壤取样与植被调查同期进行,在植被样方周围随机均匀设置土壤取样点,每个样地设置取样点9个,按0—5 cm,5—10 cm,10—20 cm,20—30 cm,30—40 cm层次用环刀和铝盒采集土样,每个取样点采集土壤水分测定样品3份混合,带回室内阴干备用,共采集土壤样品180个。土壤容重采用环刀法测定<sup>[18]</sup>;土壤粒径采用马尔文激光粒度衍射仪测定<sup>[18]</sup>,划分标准根据美国农业部制粒径分级,土壤粒径划分为砂粒(0.05~2 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)和黏粒(<0.002 mm)。

**1.2.4 入渗试验** 2021年8月中旬,配合植被样方调查,同期在植被样方周围开展土壤入渗调查,采用

自制双环法测定土壤初渗速率及稳渗速率<sup>[19]</sup>,环高30 cm,厚2 mm,外环直径为20 cm,内环直径为10 cm,每个小区设置9个试验点。选取地势平坦的地带,测定前将地表植被和枯落物清理干净,将双环平稳压入土壤中,保证内外环高度一致,地表出露高度为15 cm,试验开始后向外环及内环加水,保证内外环水位齐平,测定开始后,记录相同高度(1 cm)水量的下渗时间,直至连续5次以上所用时间相同,可以认为土壤达到稳渗,稳渗速率为连续5次土壤入渗速率的均值。

**1.2.5 人工模拟降雨试验** 人工模拟降雨试验采用下喷式模拟降雨系统,有效降雨面积为3 m×6 m,降雨高度为2 m。根据达茂旗多年气象资料记录的实际降雨情况,设置30,60,90,120 mm/h的4个雨强梯度,于2021年8月中旬,选取晴朗无风的天气在各放牧样地内进行降雨模拟试验。采用简易径流小区控制和收集试验产生的径流样品,每个放牧强度样地根据降雨强度布设4组简易径流小区(坡度均为3°~5°,且土壤质地、水分等下垫面情况基本保持一致),每个雨强设2个重复,共布设32个简易径流小区,简易径流小区长2 m,宽1 m,高30 cm,小区边墙材料为厚铁皮,埋入地下15 cm深,使用前做边墙防水处理。降雨开始后,每1 min收集一次径流样品,10 min后每5 min收集一次径流样品,测量径流体积,过滤后烘干称重测量泥沙含量,每场降雨试验历时30 min,相同雨强降雨模拟试验集中在1~2 d内完成。图2为试验现场工作场景。



观测小区布设



降雨试验取样

图2 人工模拟降雨试验布设

### 1.3 数据处理

植被群落多样性指数采用Patrick物种丰富度指数、Simpson优势度指数、Pielou均匀度指数及Shannon-Wiener多样性指数进行分析,其公式如下:

Simpson优势度指数:

$$SP = 1 - \sum P_i^2 \quad (1)$$

Shannon-Wiener指数:

$$H = - \sum P_i \ln P_i \quad (2)$$

Pielou 均匀度指数:

$$J_{sw} = H / \ln S \quad (3)$$

式中:  $P_i = N_i / N$ ,  $N_i$  为样方中第  $i$  种植物的重要值;  $N$  为样方植物重要值的总和;  $S$  为样地物种数 (Partrick 物种丰富度指数)。

通径分析是通过自变量和因变量之间的相关分解来研究因变量的相关重要性,分为直接影响作用(直接通径系数)和间接影响作用(间接通径系数),并通过决策系数来反映自变量对因变量的综合作用,将决策系数从大到小排序,最大的为主要决策变量,但未必其直接决定作用大;排序小的变量若为负,则为主要限制性变量,但未必其直接决定作用小<sup>[20-23]</sup>。因此,利用通径分析可以较为清晰地找到影响各放牧样地的具体驱动因素,并可以直观地得出驱动程度的大小,适合用于寻找各放牧样地影响土壤侵蚀的复杂多变的驱动因素。具体计算过程参考前人<sup>[24-25]</sup>的研究。本文中各样地侵蚀量正态检验采用 Shapiro-Wilk 检验,结果显示显著水平均大于  $p = 0.05$ ,符合正态分布,可进行通径分析。本文中的统计分析均采用 SPSS 24.0 软件,其中不同放牧强度植被群落生态指标、土壤容重、土壤入渗性能及不同雨强下土壤侵蚀量的数据均采用单因素 ANOVA 方差分析,进一步采用沃勒—邓肯法进行事后多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 放牧对植物群落生态指标的影响

表 1 为不同放牧强度下的植被群落生态指标特征。植被盖度、高度和生物量可直观反映地上植被在不同放牧强度下的整体发育情况。

由表 1 可以看出,4 种放牧强度对草本物种的生长状况具有显著影响,随着放牧强度的增加,群落平均盖度、高度和地上生物量呈降低趋势,其中无放牧样地的盖度(43%)、高度(10.35 cm)和生物量(86.97 g)的均值皆为最高。轻度、中度和重度放牧样地之间盖度存在显著差异,高度和地上生物量差异不显著。草地植物群落的物种多样性有助于维持草地生态系统的结构、功能及可持续性发展<sup>[26]</sup>。物种丰富度指数的变化规律为:重度放牧>无放牧>中度放牧>轻度放牧,重度放牧样地显著高于其他放牧样地,其丰富度指数为 9.64,轻度放牧样地显著低于其他放牧样地,其丰富度指数为 8.28。多样性指数和均匀度指数的变化规律均表现为:无放牧>重度放牧>中度放牧>轻度放牧,轻度放牧样地的多样性指数和均匀度指数显著低于其他放牧样地,其指数分别为 1.41,0.67。Simpson 优势度指数在 4 个放牧样地间无显著差异。

表 1 不同放牧强度植物群落生态指标特征

| 群落特征                | CK                      | LG                      | MG                      | HG                       | F 值    | p 值   |
|---------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------|-------|
| 盖度/%                | 43±3 <sup>a</sup>       | 41±3 <sup>a</sup>       | 37±3 <sup>b</sup>       | 30±3 <sup>c</sup>        | 35.508 | 0.000 |
| 高度/cm               | 10.35±6.22 <sup>a</sup> | 5.93±3.89 <sup>b</sup>  | 5.82±4.25 <sup>b</sup>  | 4.46±3.37 <sup>b</sup>   | 33.235 | 0.000 |
| 地上生物量/g             | 86.97±9.53 <sup>a</sup> | 49.89±6.74 <sup>b</sup> | 38.19±5.60 <sup>b</sup> | 42.15±11.83 <sup>b</sup> | 32.371 | 0.000 |
| Patrick 物种丰富度指数     | 8.91±2.23 <sup>b</sup>  | 8.28±1.21 <sup>c</sup>  | 8.82±2.12 <sup>b</sup>  | 9.64±1.37 <sup>a</sup>   | 0.978  | 0.413 |
| Simpson 优势度指数       | 0.79±0.08 <sup>a</sup>  | 0.75±0.11 <sup>b</sup>  | 0.78±0.07 <sup>a</sup>  | 0.78±0.02 <sup>a</sup>   | 0.515  | 0.674 |
| Shanon-Wiener 多样性指数 | 1.69±0.27 <sup>a</sup>  | 1.41±0.21 <sup>b</sup>  | 1.62±0.19 <sup>b</sup>  | 1.68±0.12 <sup>a</sup>   | 4.850  | 0.006 |
| Pielou 均匀度指数        | 0.79±0.09 <sup>a</sup>  | 0.67±0.07 <sup>b</sup>  | 0.76±0.07 <sup>a</sup>  | 0.77±0.03 <sup>a</sup>   | 5.602  | 0.003 |

注:①表中数据为平均值±标准差;②CK 表示无放牧样地, LG 表示轻度放牧样地, MG 表示中度放牧样地, HG 表示重度放牧样地。③字母表示同一指标不同放牧强度的差异性( $p < 0.05$ ), 字母不同表示变量之间存在显著差异,反之则表示变量之间差异不显著。下同。

### 2.2 放牧对土壤水文物理性质的影响

土壤颗粒的形态和数量差异影响着土壤的物理性质,研究其分布特征是探明土壤性质变异规律的重要前提。研究区整体土壤粒径组成均以砂粒含量为主(51.58%~75.76%)。随着放牧强度的增加,土壤砂粒含量呈上升趋势,且放牧作用对土壤表层(0—10 cm)粒径组成影响最为显著。相同放牧强度条件下,均表现为随着土层的加深,土壤砂粒含量逐渐上升。而重度放牧强度下,其表层土壤砂粒含量显著高于其他放牧样地,这可能与重度放牧导致的表土粗粒

化现象有关(图 3)。

土壤容重作为草地退化的数量指标,对放牧引起的土壤物理性质的变化较为敏感<sup>[27]</sup>。由图 4 可知,相同放牧强度下,各样地土壤容重均表现为随土层深度增加容重增加。相同土层深度下,0—5 cm 深度土层,土壤容重按大小排序依次为:中度(1.47 g/cm<sup>3</sup>)>轻度(1.42 g/cm<sup>3</sup>)>重度(1.39 g/cm<sup>3</sup>)>无放牧样地(1.37 g/cm<sup>3</sup>)。在 5—10 cm 深度土层,容重表现为随放牧强度的增加,容重呈上升趋势,其中,重度放牧样地土壤容重最高为 1.54 g/cm<sup>3</sup>,显著高于其他放牧样

地。10—20 cm, 20—30 cm, 30—40 cm 土层深度土壤容重无显著差异( $p < 0.05$ )。说明放牧作用可能会造成

0—10 cm 深度土壤容重增加, 是土壤更为紧实, 重度放牧还可能造成 0—5 cm 土层出现粗粒化现象。

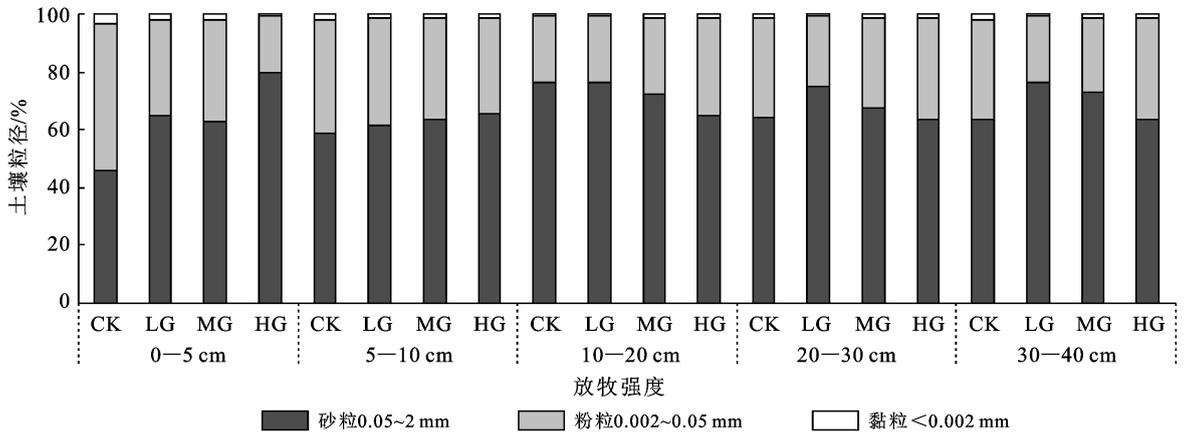


图 3 不同放牧强度各土层土壤粒径分布特征

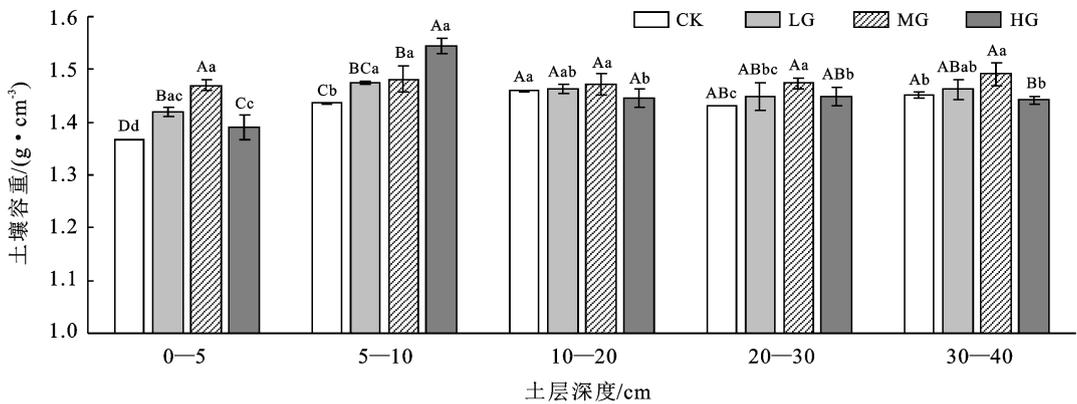


图 4 不同放牧强度各土层土壤容重变化特征

土壤的入渗性能不仅影响着植被生长, 还影响着降雨的侵蚀过程。由图 5 可知, 无放牧样地的初渗速率最快, 为 11.05 ml/min。不同放牧强度土壤稳渗速率在 3.71~5.15 ml/min 之间。平均入渗速率的变化趋势与稳渗速率基本一致, 整体呈重度放牧样地土壤稳渗速率和平均入渗速率显著低于其他样地的规律, 分别为 0.84 和 0.98 ml/min。

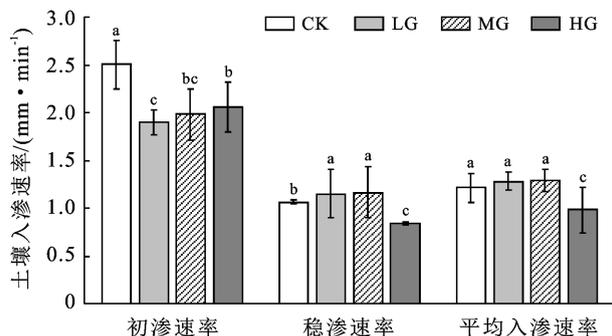


图 5 不同放牧强度下土壤入渗速率

### 2.3 放牧对土壤侵蚀特征的影响

大量研究<sup>[28]</sup>证实, 地表植被破坏, 土壤理化性质改变会导致土壤侵蚀作用加剧。由图 6 可知, 各放牧强度的产沙量间存在显著差异, 且随着雨强的增大而增加。相同降雨强度下, 不同放牧强度样地的侵蚀产沙大小顺序为: 重度 > 中度 > 轻度 > 无放牧样地。相同放牧强度下, 不同降雨强度的侵蚀产沙规律表现为: 30 mm/h < 60 mm/h < 90 mm/h < 120 mm/h。可见, 随着放牧强度的增加, 水土流失作用加剧, 且雨强越大, 重度放牧的土壤侵蚀越突出。

### 2.4 不同环境要素对侵蚀量的驱动作用

以侵蚀量为因变量, 各放牧样地的盖度、高度、地上生物量、Simpson 优势度指数、砂粒含量、粉粒含量、黏粒含量、表层容重、初渗速率、稳渗速率及平均入渗速率为自变量进行通径分析, 结果详见表 2。直接通径系数反映了各驱动因子对侵蚀量的直接影响作用, 间接通径系数却是一种间接影响力, 指的是主要驱动因子通过其他驱动因子对侵蚀量产生的间接

影响程度。通过通经分析得出的直接和间接影响力更具有客观性,因而也更具有真实表现力。而决策系数反映了各驱动因子对侵蚀力的综合作用大小,利用决策叙述排序可以很方便的确定各变量在决策中的作用,如确定主要决定性变量和主要限制性变量。在无放牧样地中,表层容重(4.568)对无放牧样地侵蚀产沙量的直接影响作用最强烈。初渗速率(3.662)对无放牧样地侵蚀产沙量的间接影响作用最大,主要通过影响表层容重(3.655)产生间接影响作用;无放牧样地的决策系数排序为:初渗速率(0.243) > 平均入渗速率(0.015) > 表层容重(-29.984),因此,初渗速率是影响无放牧样地侵蚀产沙量的决策变量,表层容重是限制变量。在轻度放牧样地中,Simpson 优势度指数(0.968)对轻度放牧样地侵蚀产沙量的直接影响作用最强烈,初渗速率(0.819)对轻度放牧样地侵蚀产沙量的间接作用最大,主要通过影响 Simpson 优势度指数(0.779)产生间接影响作用;对决策系数进行排序为:初渗速率 > 地上生物量 > Simpson 优势度指数,由此可见,初渗速率是影响无放牧样地侵蚀产沙量的决策变量,Simpson 优势度指数是限制变量。在中度放牧样地中,Simpson 优势度指数(5.841)的直接影响作用要大于植被高度(0.435),而植被高度主要是通过影响 Simpson 优势度指数(5.578)来间接影

响中度放牧样地侵蚀产沙量。Simpson 优势度指数和植被高度的决策系数均小于 0,即 Simpson 优势度指数和植被高度是影响中度放牧样地侵蚀产沙量的限制变量,Simpson 优势度指数是主要限制变量,植被高度是次要限制变量。

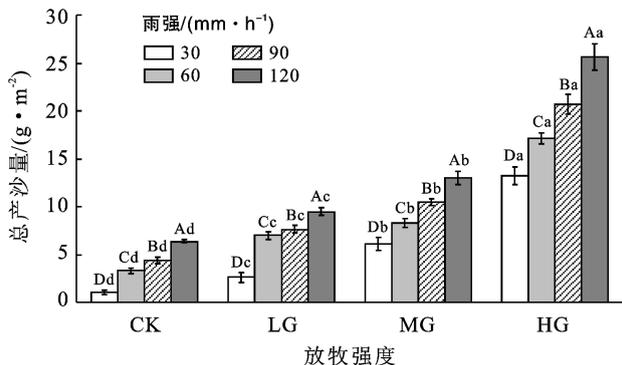


图 6 不同雨强下各放牧强度样地土壤侵蚀量变化特征

在重度放牧样地中,黏粒含量(2.382)对重度放牧样地侵蚀产沙量的直接影响作用最为强烈,地上生物量(2.396)对重度放牧样地的间接影响作用最大,主要通过影响黏粒含量(2.342)产生间接作用;对决策系数进行排序为:砂粒含量 > 地上生物量 > 黏粒含量,因此,砂粒含量是影响重度放牧样地侵蚀产沙量的决策变量,黏粒含量是限制变量。

表 2 侵蚀量与环境变量相关系数分解

| 放牧强度 | 自变量             | 与 y 的相关系数 | 直接通径系数 | 间接通径系数 |                 |        | 总间接作用  | 决策系数    |
|------|-----------------|-----------|--------|--------|-----------------|--------|--------|---------|
|      |                 |           |        | 表层容重   | 平均入渗速率          | 初渗速率   |        |         |
| CK   | 表层容重            | -0.998    | 4.568  |        | 0.012           | -0.125 | -0.113 | -29.984 |
|      | 平均入渗速率          | -0.153    | 0.043  | 1.233  |                 | -0.026 | 1.207  | 0.015   |
|      | 初渗速率            | 0.866     | 0.154  | -3.655 | -0.007          |        | -3.662 | 0.243   |
| 放牧强度 | 自变量             | 与 y 的相关系数 | 直接通径系数 | 间接通径系数 |                 |        | 总间接作用  | 决策系数    |
|      |                 |           |        | 地上生物量  | Simpson 生态优势度指数 | 初渗速    |        |         |
| LG   | 地上生物量           | -0.988    | 0.041  |        | 0.829           | -0.117 | 0.712  | -0.083  |
|      | Simpson 生态优势度指数 | -0.775    | 0.968  | 0.035  |                 | -0.097 | -0.062 | -2.437  |
|      | 初渗速率            | 0.972     | 0.121  | -0.039 | -0.779          |        | -0.819 | 0.221   |
| 放牧强度 | 自变量             | 与 y 的相关系数 | 直接通径系数 | 间接通径系数 |                 |        | 总间接作用  | 决策系数    |
|      |                 |           |        | 植被高度   | Simpson 生态优势度指数 |        |        |         |
| MG   | 植被高度            | -0.989    | 0.455  |        | 5.578           |        | 5.578  | -1.107  |
|      | Simpson 生态优势度指数 | -0.981    | 5.841  | 0.435  |                 |        | 0.435  | -45.577 |
| 放牧强度 | 自变量             | 与 y 的相关系数 | 直接通径系数 | 间接通径系数 |                 |        | 总间接作用  | 决策系数    |
|      |                 |           |        | 地上生物量  | 砂粒含量            | 黏粒含量   |        |         |
| HG   | 地上生物量           | -0.981    | 0.079  |        | -0.054          | -2.342 | -2.396 | -0.161  |
|      | 砂粒含量            | 0.981     | 0.058  | -0.074 |                 | 2.251  | 2.177  | 0.110   |
|      | 黏粒含量            | 0.986     | 2.382  | -0.078 | 0.055           |        | -0.023 | -0.977  |

### 3 讨论

放牧主要是通过牲畜的采食和践踏活动影响草

地的植被群落结构和土壤物理性质。本研究发现,随着放牧强度的增加,丰富度指数从 8.91 增长至 9.64,生物量从 86.97 g 降低至 42.15 g,盖度从 43%降低至

30%。本课题组在试验过程中,通过对各放牧样地物种相对盖度的初步调查和试验得出,随着放牧强度的增加,牲畜喜食的植物种,如冰草(*Agropyron cristatum*)、羊草(*Leymus chinensis*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)和克氏针茅(*Stipa krylovii*)均在减少,植物体也表现为矮小化;草原退化演替的指示物种,如银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)和冷蒿(*Artemisia frigida*)等物种开始出现,生物多样性有明显上升。可以看出,放牧虽然使得样地内物种丰富度指数上升,但是却导致了样地内生物量及盖度整体的减少。已有研究证实,随着放牧强度的增加,植株被践踏的概率变大,从而使得叶片数量减少,植株的光能利用率降低,出现了欠补偿性生长,最终限制了植物的正常生长<sup>[29-31]</sup>,导致出现了盖度降低、高度下降、生物量减少的现象。另一方面,原有群落结构被破坏,造成物种入侵,短期内会使生物多样性上升<sup>[32-34]</sup>。

放牧侵蚀是牲畜扰动与风力、水力等环境因素共同作用的结果,侵蚀程度的大小由放牧强度、下垫面特征等因素综合决定<sup>[28]</sup>。本研究结果表明,在同一雨强下,土壤侵蚀量随放牧强度的增加而逐渐增大,其下垫面的植被盖度越大,牲畜践踏啃食破坏越小,侵蚀量就越小,这与郭建英<sup>[35]</sup>在阴山北麓的荒漠草原得出的结果一致。许志信等<sup>[36]</sup>在草甸草原的研究中得出,随着放牧强度的增加,土壤侵蚀越来越严重,其中草地重度利用区土壤侵蚀量是未受干扰区草地的17.8倍。可见,放牧会显著影响土壤侵蚀量的产生,而不同放牧强度对土壤侵蚀量的影响具有差异性<sup>[37]</sup>。放牧产生影响的初期,主要是草本植物的多样性和生物量发生了改变,随着放牧强度的增加,影响作用扩展到土壤层。本研究通径分析也得出,不同放牧强度下土壤侵蚀特征的决定因素有所不同。放牧初期牲畜的采食会刺激植物的生长<sup>[29]</sup>,因此影响其土壤侵蚀特征的决定因素与无放牧样地一致,均取决于土壤本身的特性。随着放牧强度的增加,Simpson优势度指数是影响土壤侵蚀特征的决定因素。有研究认为,Simpson优势度指数与植被的盖度及生物量均存在显著正相关<sup>[38]</sup>,可见,放牧对侵蚀过程首要影响的是地表植被,植被被家畜大量啃食后,只剩下吸水能力较弱的茎秆,降雨的截留量显著下降<sup>[39]</sup>。另一方面,随着生物量的降低,地表枯落物的厚度也会显著下降,进而影响枯落物的持水量<sup>[40]</sup>。地表植被被破坏后,随着放牧强度的持续增加,土壤砂粒含量是影响放牧样地土壤侵蚀量的决定因素,相关研究证实,随着放牧强度的增加,地表裸露斑块增加,地表土壤粗粒化趋势明显,导致土壤持水能力下降<sup>[41-42]</sup>。牲

畜持续踩踏产生的累积效应使得土壤整体趋向于紧实,土壤的导水能力下降<sup>[43]</sup>,最终导致土壤入渗性能降低,加剧了侵蚀的发生。这与本研究结论一致,重度放牧样地平均入渗速率为0.98 mm/min,显著低于其他样地。

综上所述,在荒漠草原地区,不同放牧强度下土壤侵蚀特征具有显著差异。轻度放牧强度的侵蚀量取决于样地自身的土壤质量,随着放牧强度的增加,地表植被遭到破坏,植被的恢复速度无法满足牲畜的采食需求,使得植被盖度持续降低。随着放牧强度的持续增加,放牧已从影响地表植被扩展到影响土壤物理特性,从而加剧了土壤侵蚀的发生。

## 4 结论

放牧会造成荒漠草原区植被盖度、生物量和生物多样性的显著下降。重度放牧会造成荒漠草原地区土壤入渗及持水能力下降,因而加剧地表土壤粗粒化。轻度和中度放牧强度下,其土壤侵蚀过程主要受植被盖度和生物多样性影响。重度放牧强度下,其土壤侵蚀过程主要取决于土壤水文物理特性。

从防治水土流失角度来看,荒漠草原地区放牧强度应控制在中度(2羊单位/hm<sup>2</sup>)及以下,或采取分季节分区轮牧方式以促进草地利用效率。对于受重度放牧破坏的草原区,除围栏封育外,还可适当补插牧草,添加微生物菌剂等提升土壤抗蚀性。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 宋丽弘,唐孝辉.内蒙古草原碳汇经济发展的基础与路径[J].中国草地学报,2012,186(2):1-7.
- [2] 韩芳,牛建明,刘朋涛,等.气候变化对内蒙古荒漠草原牧草气候生产力的影响[J].中国草地学报,2010,32(5):57-65.
- [3] 侯向阳,纪磊,王珍.荒漠草原与典型草原 NPP、碳积累对不同降雨年份和利用方式的响应[J].生态学报,2014,34(21):6256-6264.
- [4] Faceli J M, Pickett S T A. Plant litter: its dynamics and effects on plant community structure [J]. the Botanical Review, 1991,57(1):1-32.
- [5] Campbell A, Alexamdra J, Curtis D. Reflections on four decades of land restoration in Australia [J]. the Rangeland Journal, 2018,39(6):405-416.
- [6] Smith R S, Shiel R S, Millward D, et al. Effects of sheep stocking on the plant community and agricultural characteristics of upland Anthoxanthum odoratum-Geranium sylvaticum meadow in Northern England [J]. Grass and Forage Science, 2017,72(3):502-515.
- [7] 常晶晶,徐丽,薛晶月,等.放牧强度对若尔盖高寒草甸

- 土壤有机质和微生物的影响[J].草业学报,2018,27(1):22-31.
- [8] Li Ruirui, Kan Shasha, Zhu Mengke, et al. Effect of different vegetation restoration types on fundamental parameters, structural characteristics and the soil quality index of artificial soil [J]. Soil and Tillage Research, 2018,184(12):11-23.
- [9] Akiyama T, Kamamura K. Grassland degradation in China: Methods of monitoring, management and restoration [J]. Grassland Science, 2007,53(1):1-17.
- [10] 史志华,刘前进,张含玉,等.近十年土壤侵蚀与水土保持研究进展与展望[J].土壤学报,2020,57(5):1117-1127.
- [11] 魏霞,李占斌,李勋贵.黄土高原坡沟系统土壤侵蚀研究进展[J].中国水土保持科学,2012,10(1):108-113.
- [12] 刘纪根,丁文峰,黄金权.长江流域水土保持科学研究进展及展望[J].长江科学院院报,2021,276(10):54-59.
- [13] 左仲国,肖培青,黄静.黄河流域水土保持科研进展及展望[J].中国水土保持,2016,414(9):63-67,93.
- [14] 陈帅.黑土区坡耕地玉米秸秆还田水土保持功效研究[D].北京:中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所),2019.
- [15] 韦杰,贺秀斌.三峡库区坡耕地水土保持措施研究进展[J].世界科技研究与发展,2011,302(1):41-45.
- [16] 王明坎,马长升.两种方法估算草地载畜量的研究[J].中国草地,1994(5):19-22.
- [17] 卫智军,韩国栋,杨静,等.短花针茅荒漠草原植物群落特征对不同载畜率水平的响应[J].中国草地,2000(6):1-5.
- [18] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [19] 王则宇.希拉穆仁草原不同植被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.
- [20] 李平,王冬梅,丁聪,等.黄土高寒区典型植被类型土壤入渗特征及其影响因素[J].生态学报,2020,40(5):1610-1620.
- [21] 王雅琼,张建军,李梁,等.祁连山区典型草地生态系统土壤抗冲性影响因子[J].生态学报,2018,38(1):122-131.
- [22] Luo Ling, Zhu Linggao, Hong Wen, et al. Microbial resource limitation and regulation of soil carbon cycle in Zoige Plateau peatland soils [J]. Catena, 2021, 205: 105478.
- [23] Pérès G, Cluzeau D, Menasseri S, et al. Mechanisms linking plant community properties to soil aggregate stability in an experimental grassland plant diversity gradient [J]. Plant and Soil, 2013, 373(1): 285-299.
- [24] 宋小园,朱仲元,刘艳伟,等.通径分析在 SPSS 逐步线性回归中的实现[J].干旱区研究,2016,33(1):108-113.
- [25] 袁志发,周静芋,郭满才,等.决策系数:通径分析中的决策指标[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2001,29(5):131-133.
- [26] 董全民,赵新全,马玉寿,等.放牧强度对高寒混播人工草地群落特征及地上现存量的影响[J].草地学报,2012,20(1):10-16.
- [27] 张成霞,南志标.放牧对草地土壤理化特性影响的研究进展[J].草业学报,2010,19(4):204-211.
- [28] 林慧龙,龙瑞军,任继周.放牧侵蚀研究回顾与展望[J].生态学杂志,2008,185(12):2222-2227.
- [29] 张峰,杨阳,乔莽璐,等.利用方式对大针茅草原植物多样性、功能性状及地上生物量的影响[J].中国草地学报,2019,41(1):1-8.
- [30] Philipp S, Wan Hongwei, Martin G, et al. Grassland responses to grazing: Effects of grazing intensity and management system in an Inner Mongolian steppe ecosystem [J]. Plant and Soil, 2011,340(1/2):103-115.
- [31] 段敏杰,高清竹,万运帆,等.放牧对藏北紫花针茅高寒草原植物群落特征的影响[J].生态学报,2010,30(14):3892-3900.
- [32] 杨利民,韩梅,李建东.中国东北样带草地群落放牧干扰植物多样性的变化[J].植物生态学报,2001,25(1):110-114.
- [33] 赵丽娅,钟韩珊,赵美玉,等.围封和放牧对科尔沁沙地群落物种多样性与地上生物量的影响[J].生态环境学报,2018,27(10):1783-1790.
- [34] 张爽,卫智军,吕世杰,等.放牧对短花针茅荒漠草原主要植物种群及群落地上现存量稳定性的影响[J].中国草地学报,2017,39(6):26-32.
- [35] 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.
- [36] 许志信,张晓明,白飞,等.草甸草原植被利用强度对水土流失影响的研究[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2001,22(1):68-73.
- [37] 李直强.草地退化和放牧时期对牛羊采食行为及采食互作关系的影响[D].吉林 长春:东北师范大学,2019.
- [38] 赵生龙,左小安,张铜会,等.乌拉特荒漠草原群落物种多样性和生物量关系对放牧强度的响应[J].干旱区研究,2020,37(1):168-177.
- [39] 马少薇,郭建英,李锦荣,等.放牧强度对短花针茅群落特征及冠层截留的影响[J].中国草地学报,2016,213(5):66-70.
- [40] 李雯,马昕昕,马宁,等.放牧强度对黄土丘陵区生物结皮土壤化学计量学特征的影响[J].草地学报,2021,29(11):2547-2555.
- [41] 尚宾.希拉穆仁典型草原不同放牧强度对土壤理化性质和径流泥沙的影响[D].山东 泰安:山东农业大学,2020.
- [42] 王琴,蒙仲举,汪季,等.希拉穆仁草原近自然恢复状态下植被—土壤响应特征[J].生态学报,2017,37(4):1159-1167.
- [43] 高英志,韩兴国,汪诗平.放牧对草原土壤的影响[J].生态学报,2004,24(4):790-797.