

放牧干扰下荒漠草原植物功能群数量特征与输沙量的关系

郭振宁^{1,2}, 孙世贤¹, 张焱³, 郭月峰², 祁伟⁴, 才旦⁵

(1.中国农业科学院草原研究所, 内蒙古呼和浩特 010010; 2.内蒙古农业大学沙漠治理学院, 内蒙古呼和浩特 010011; 3.包头市林业和草原工作站, 内蒙古包头 014030; 4.内蒙古水利事业发展中心水土保持部, 内蒙古呼和浩特 010020; 5.长江源园区国家公园曲麻莱管理处生态保护站, 青海玉树 815500)

摘要: [目的] 分析放牧干扰下草地群落及功能群数量特征变化与草地土壤风蚀间的关系, 阐明草地不同功能群对草地侵蚀过程的影响, 为荒漠草原合理放牧利用及保护提供理论依据。[方法] 以内蒙古短花针茅荒漠草原为研究对象, 采取完全随机试验设计设置对照、中度和重度 3 个不同的放牧处理, 对不同处理下的草地输沙量和功能群特征进行研究。[结果] ①随放牧强度增加, 各功能群内物种高度、盖度和地上生物量基本呈下降态势。适当放牧能显著提高 Simpson 优势度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数。②各放牧处理间的草地输沙量差异显著, 不同输沙高度处的草地输沙量变化规律均为 HG>MG>CK, 同一放牧处理下, 随输沙高度上升输沙率显著降低。③各功能群高度、盖度与输沙量均存在指数负相关关系, 其中多年生禾草和多年生杂类草的高度变化对输沙量的影响更显著。各功能群的地上生物量与输沙量存在负相关指数关系, 其中多年生禾草的生物量与输沙量的拟合程度最高。[结论] 过度放牧会显著影响功能群特征并降低草地的防风固沙能力, 建议放牧强度控制在中度及以下。

关键词: 荒漠草原; 输沙量; 功能群; 防风固沙

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)01-0029-11

中图分类号: S812

文献参数: 郭振宁, 孙世贤, 张焱, 等. 放牧干扰下荒漠草原植物功能群数量特征与输沙量的关系[J]. 水土保持通报, 2024, 44(1): 29-39. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.01.004; Guo Zhenning, Sun Shixian, Zhang Yan, et al. Relationship between plant functional group quantitative characteristics and sand transport in desert grasslands under grazing disturbance [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1): 29-39.

Relationship Between Plant Functional Group Quantitative Characteristics and Sand Transport in Desert Grasslands Under Grazing Disturbance

Guo Zhenning^{1,2}, Sun Shixian¹, Zhang Yan³, Guo Yuefeng², Qi Wei⁴, Caidan⁵

(1. Institute of Grassland Research, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hohhot, Inner Mongolia 010010, China; 2. School of Desert Governance, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010011, China; 3. Forestry and Grassland Workstation of Baotou, Baotou, Inner Mongolia 014030, China; 4. Water and Soil Conservation Department of Inner Mongolia Water Resources Development Center, Hohhot, Inner Mongolia 010020, China; 5. Ecological Protection Station, Qumalai Administration Office, Yangtze River Source Park National Park, Yushu, Qinghai 815500, China)

Abstract: [Objective] The relationship between grassland community and functional group quantity changes under grazing disturbance and soil wind erosion in grasslands was analyzed, and the influence of different functional groups on grassland erosion processes were determined to provide a theoretical basis for the rational use and protection of desert grasslands. [Methods] The study was conducted on desert grasslands of

收稿日期: 2023-04-23

修回日期: 2023-07-10

资助项目: 鄂尔多斯市科技重大专项“鄂尔多斯荒漠草原植被近自然恢复与土壤保育关键技术研发与示范”(2021EEDSCXQDFZ011); 内蒙古自治区科技计划项目“乌珠穆沁沙地生态脆弱区植被恢复与重建技术研究”(2020GG0077), “浑善达克沙地水资源保护与植被近自然修复技术研究与示范”(2021GG0056)

第一作者: 郭振宁(1996—)男(汉族), 内蒙古自治区乌兰察布市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。Email: 2043742139@qq.com。

通信作者: 孙世贤(1986—)男(汉族), 甘肃省武威市人, 博士, 副研究员, 主要从事草原生态修复与改良的研究。Email: nmgsxx@163.com。

Stipa breviflora in Inner Mongolia. A completely randomized experiment was conducted with three grazing treatments: control (CK), moderate grazing (MG), and heavy grazing (HG). Sand transport and functional group characteristics under different treatments were determined. [Results] ① The height, coverage, and aboveground biomass of each functional group generally declined as grazing intensity increased. Appropriate grazing significantly increased the Simpson dominance index and the Shannon-Wiener diversity index. ② Differences in sand transport among different grazing treatments were significant. Sand transport related to different heights followed the order of $HG > MG > CK$, and sand transport rate decreased significantly as height increased under the same grazing treatment. ③ There was an exponential negative correlation between height, coverage of each functional group, and sand transport, with the height changes of perennial grasses and perennial forbs having a more significant impact on sand transport. Aboveground biomass of each functional group was negatively correlated with sand transport, with the highest fitting degree observed between the biomass of perennial grasses and sand transport. [Conclusion] Overgrazing significantly affected functional group characteristics and reduced the windbreak and sand-fixing capacity of grasslands. Grazing intensity of desert grasslands in Inner Mongolia should be limited to moderate levels or below.

Keywords: desert grassland; sand transportation; functional group; wind prevention and sand fixation

土壤侵蚀普遍存在于干旱半干旱地区,对 1/3 的陆地造成影响,是沙尘天气物质的主要来源^[1-2]。内蒙古作为中国生态安全屏障中北方防沙带的主体,具有很高的生态战略地位。荒漠草原作为由草原向荒漠过渡的一种脆弱生态系统,稳定性较低,抗干扰能力差。长期不合理的放牧活动导致荒漠生态系统变得更加脆弱,草原由原来的植被退化发展成为严重的土壤退化,出现了明显的裸露斑块和区域性荒漠化,草地生产力和生态屏障功能明显降低^[3]。放牧作为草地的主要利用方式,其导致的草地风蚀加剧和草地沙化过程已经引起了人们的普遍关注^[4]。相对于其他生态系统,荒漠草原生态系统面临风蚀和放牧的双重压力^[5]。风蚀越严重,风沙流的强度就越大,由于土壤颗粒的输送和堆积导致的风沙危害也越来越严重。所以,要想防治风沙危害、改善荒漠草原的生态环境的根本还在于抑制和削弱风沙流的强度。

过度放牧会加剧土壤侵蚀的危害,全球超过一半的草地存在过度放牧现象,由超载和过度放牧引起的草地退化是沙化土地面积增加的主要原因,过度放牧引起的草地风蚀加剧和草地沙化现象已经引起人们的普遍关注^[6]。因此,研究不同放牧条件下草原风蚀和风沙沉积量对合理利用草地资源和保护天然草原生态系统具有重要意义。过度放牧改变了植物群落的组成和结构,随着植被的根茎被啃食,植物群落的高度。盖度和地上生物量显著降低,使草地生产力大幅度下降^[7]。植物群落的组成和结构等功能性状反映了植物对生长环境的响应和适应。植物功能群作为沟通植物的结构和功能与生态系统属性的桥梁,将环境、植物个体和生态系统结构、过程与功能联系起

来。目前,放牧干扰对草地风蚀的影响有一些研究,随着放牧强度的增大,风蚀越严重,风沙沉积量也越多,在放牧程度较低的原生草地上,由于植被覆盖度的保护作用,气流很难接触地表,所以风蚀量很小^[8-10]。植被对风蚀的影响主要取决于群落密度和植物组成,植物密度增加能有效降低风蚀作用^[11]。在干旱、半干旱地区将植被盖度控制在一定范围对有效防治土壤风蚀具有重要意义^[12-13]。因此,研究放牧干扰下土壤侵蚀过程中草地输沙量变化与功能群特征的关系有助于合理利用草地资源,对维持草地的生态服务功能具有重要意义。目前有研究表明,在荒漠草原地区,过度放牧会引起植被退化、草地裸露并且土壤肥力下降,进一步加剧了土壤侵蚀的发生^[14-15],但是荒漠草原地区关于土壤侵蚀的研究主要集中在风沙流结构方面^[16-17],关于放牧干扰下草地防风固沙能力的研究还不完善。基于此,本文以内蒙古苏尼特右旗的荒漠草原为研究对象,建立不同放牧强度原位监测小区,分析不同放牧调控下草地群落及功能群数量特征变化与草地风蚀之间的相关关系,进而阐明草地不同功能群对草地侵蚀的影响,为荒漠草原合理放牧利用及保护提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

研究区位于内蒙古高原短花针茅(*Stipa breviflora*)荒漠草原地带,地处内蒙古锡林郭勒盟境内的苏尼特右旗赛汉塔拉的朱日和镇($112^{\circ}47'16.9''E$, $42^{\circ}16'26.2''N$),试验区年均降水量 183.0 mm,年平均气温 $5.8^{\circ}C$,日照时数 3 137.3 h,年蒸发量 2 793.4 mm,

$\geq 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的有效年积温 $3\ 426\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的有效年积温 $2\ 491\text{ }^{\circ}\text{C}$, 无霜期 177 d, 属中温型气候。该地区地形起伏明显, 土壤类型为淡栗钙土, 腐殖质厚度 $5\sim 10\text{ cm}$, 钙积层明显, 厚度在 $10\sim 35\text{ cm}$ 左右, 试验区主要以短花针茅为建群种, 碱韭 (*Allium polyrhizum*) 和无芒隐子草 (*Cleistogenes songorica*) 为优势种, 银灰旋花 (*Convolvulus ammannii*)、糙隐子草 (*Cleistogenes squarrosa*)、阿尔泰狗娃花 (*Heteropappus altaicus*)、木地肤 (*Kochia prostrata*)、寸草苔 (*Carex duriuscula*)、细叶韭 (*Allium tenuissimum*)、栉叶蒿 (*Neopallasia pectinata*) 等为伴生种。

1.2 试验设计

受当地气候条件限制, 为确保研究的准确性和代表性, 采用与当地牧民相同的放牧制度。放牧试验进行了两年 (2020—2021 年), 于每年 5 月开始至 10 月结束。试验长度跨越春夏秋 3 个季节, 试验根据放牧强度设 3 个处理, 分别为不放牧 (CK)、中度放牧 (MG) 和重度放牧 (HG) 3 种模式; 每个处理共 3 个重复, 共设 9 个放牧小区。其中, 每个小区面积为 2.57 hm^2 , 小区随机排列。根据放牧强度不同, 小区内分别放羊只数为 0, 6 和 9 只, 折算成载畜量为 0, 2.33 和 3.50 只羊/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)^[18]。

1.3 试验方法

根据不同放牧处理, 在每个小区内各安装 3 个高度为 2 m 的集沙仪, 分别在距地面 10, 25, 40 和 100 cm 处各安装 1 个集沙盒, 每个集沙盒的进沙口的宽和高分别为 2 和 5 cm。以每年的放牧试验为周期, 从第 1 年 5 月到次年 4 月为集沙仪沙样收集期, 次年 4—5 月春季草地返青前为沙样的人工取样期, 研究期中沙样品的收集和取样各 2 次。将 4 个不同输沙高度采集的沙样品带回实验室称重得到集沙量, 并通过公式计算得到单位横截面积的输沙量。

另外, 在 2020—2021 年每年的 5—10 月, 每个月采用样方法在各放牧小区随机布设 3 个 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的样方, 调查样方内所有植物的高度、盖度、密度以及地上生物量。高度用卷尺测量, 盖度采用目测估算法, 密度采用计数法, 将所调查的植物齐地面剪掉带回实验室用 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的烘箱烘干后称重。按照各植物的生长生活型差异, 将群落中的物种划分为: ①灌木、半灌木、小半灌木 (shrub and subshrub, 简称为 SH); ②多年生禾草 (perennial bunch grasses, 简称为 PB); ③多年生杂类草 (perennial forbs, 简称为 PF); ④一、二年生草本 (annual or biennial herb, 简称为 AB) 共 4 种类型, 确定功能群群落特征与草地输沙量之间的相互关系。功能群内植物组成见表 1。

表 1 功能群类型及其植物构成

Table 1 Types of functional groups and their plant composition

功能群类型	植物种类	
多年生禾草 (PB)	短花针茅 (<i>Stipa breviflora</i>)	
	无芒隐子草 (<i>Cleistogenes songorica</i>)	
	寸草苔 (<i>Carex duriuscula</i>)	
灌木、半灌木、小半灌木 (SH)	狭叶锦鸡儿 (<i>Caragana stenophylla</i> Pojark)	
	天门冬 (<i>Asparagus gobicus</i>)	
	木地肤 (<i>Kochia prostrata</i>)	
	碱韭 (<i>Allium polyrhizum</i>)	
	银灰旋花 (<i>Convolvulus ammannii</i>)	
	猪毛蒿 (<i>Artemisia scoparia</i> Waldst)	
	黄芪 (<i>Astragalus propinquus</i>)	
	细叶葱 (<i>Allium tuberosum</i>)	
	细叶韭 (<i>Allium tenuissimum</i>)	
	叉枝丫葱 (<i>Scorzonera divaricata</i>)	
多年生杂类草 (PF)	蒙古葱 (<i>Allium mongolicum</i>)	
	阿尔泰狗娃花 (<i>Heteropappus altaicus</i>)	
	栉叶蒿 (<i>Neopallasia pectinata</i>)	
	猪毛菜 (<i>Salsola collina</i>)	
	狗尾草 (<i>Setaria viridis</i>)	
	画眉草 (<i>Eragrostis pilosa</i>)	
	蒺藜 (<i>Tribulus terrestris</i>)	
	一、二年生草本 (AB)	

1.4 数据处理与分析

植物群落的数量特征采用样方法, 按照功能群类型划分测定自然高度、盖度、地上生物量等指标。群落多样性指数采用 Simpson 优势度指数 (D) 和 Shannon-Wiener 多样性指数 (H) 分析, 其公式分别为 (1) 和 (2)。

$$D = 1 - \sum_{i=1}^n P_i^2 \quad (1)$$

$$H = - \sum_{i=1}^n P_i \ln P_i \quad (2)$$

式中: P_i 表示第 i 个物种的重要值; n 表示一样方向植物总数。

风沙流结构的水平通量可以用单位时间内通过单位横截面积的沙粒质量来表示, 即输沙率, 它是评价地表土壤侵蚀和土地荒漠化的重要指标^[19-20]。输沙率 (q_h) 和输沙通量 (Q) 分别由公式 (3) 和 (4) 计算。

$$q_h = \frac{m_h}{s * t} \quad (3)$$

$$Q = \int_0^{1m} q_h dh \quad (4)$$

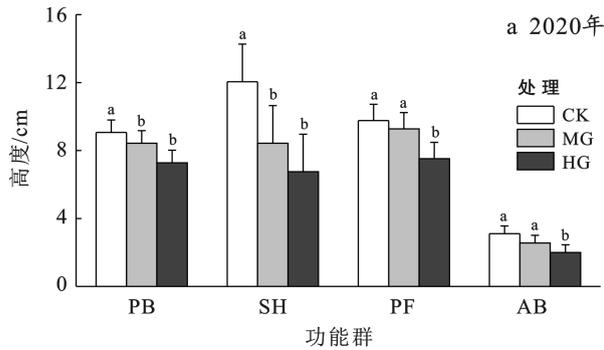
式中: m_h 为每层沙量 (g); s 为集沙盒进沙口面积 (cm^2); t 为集沙时间; q_h 为每层集沙盒的输沙率 [$\text{g}/(\text{cm}^2/\text{d})$]; Q 为地表到 1 m 高度内的输沙通量。

运用 SPSS 24 数据统计分析软件对不同放牧强度下各功能群的高度、盖度及地上生物量与输沙量进行单因素方差分析 (one-way ANOVA), 并对同一时期不同放牧处理下输沙量和功能群的高度、盖度及地上生物量进行拟合处理, 利用 Origin 2018 软件进行绘图, 目的是量化输沙量与生物量之间的关系。 $p < 0.05$ 和 $p < 0.01$ 表示差异性显著和极显著。

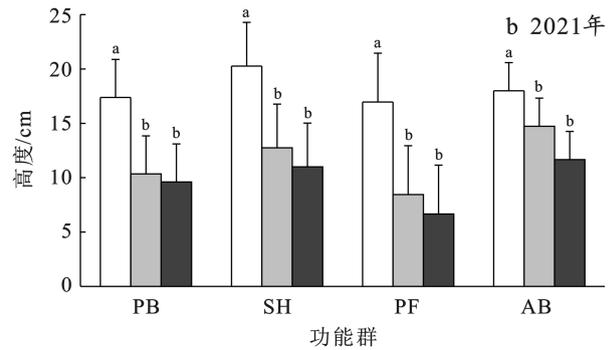
2 结果与分析

2.1 放牧对功能群群落数量特征的影响

由图 1 可见,随着放牧强度的增加,各功能群的平均高度均逐渐降低,在重度放牧处理下最低。多年生禾草、半灌木小半灌木、多年生杂类草和一、二年生草本在 2020 年分别为 7.28,6.75,7.52 和 2.00 cm,显



著低于对照和中度放牧处理($p < 0.05$);在 2021 年分别为 9.61,11.00,6.66 和 11.67 cm,同样显著低于对照和中度放牧处理($p < 0.05$)。2020 年各功能群的平均高度普遍低于 2021 年。导致这样的原因主要是由于降水的年际差异,2020 年全年气候干燥,降水稀少,主要集中在 9—10 月。2021 年全年气候相对较湿,降水均匀,主要集中在 6—8 月。



注:①CK, MG, HG 分别为不放牧、中度放牧、重度放牧处理;②PB 为多年生禾草,SH 为灌木、半灌木、小半灌木,PF 为多年生杂类草,AB 为一、二年生草本;③柱上不同字母表示各放牧处理间差异显著($p < 0.05$),下同。

图 1 不同放牧强度下的功能群平均高度

Fig.1 Average height of functional groups under different grazing intensities

由图 2 可见,多年生禾草的盖度随着放牧强度的增加呈现逐渐下降趋势,两年内均在重度放牧处理下显著低于对照和中度放牧处理($p < 0.05$),分别为 1.19% 和 0.57%。半灌木、小半灌木的盖度在 2020 年的重度放牧和中度放牧处理下,分别为 0.73% 和 1.20%,显著低于对照($p < 0.05$),而在次年,该功能

群盖度在各放牧处理之间不存在显著差异。多年生杂类草的盖度在两年中的中度放牧和重度放牧处理下,显著低于对照处理($p < 0.05$)。一、二年生草本的盖度在 2020 年的中度处理下为 1.42%,显著高于对照和重度放牧处理($p < 0.05$),次年,各处理之间差异不显著。

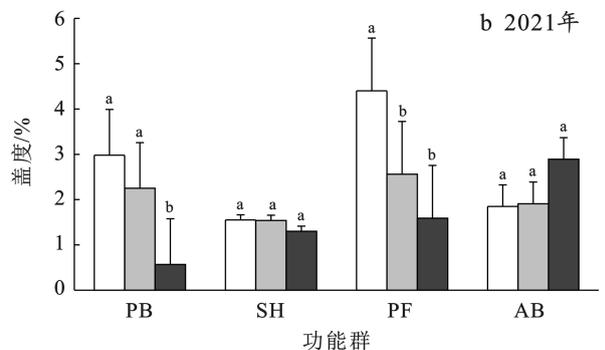
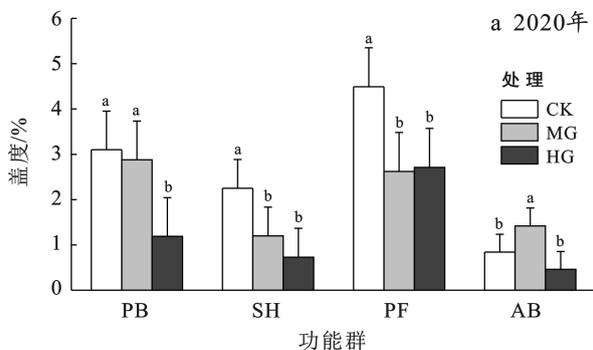


图 2 不同放牧下的功能群盖度

Fig.2 Functional group coverage under different grazing intensities

由图 3 可见,随着放牧强度的增加,多年生禾草的地上生物量呈现出逐渐递减的趋势。其中,对照和中度放牧处理显著高于重度放牧处理($p < 0.05$),但是对照和中度放牧两个处理之间差异不显著。2020 年的数据显示,半灌木、小半灌木的地上生物量在各个放牧处理之间不存在显著差异,分别为 3.48,3.22,3.65 g/m^2 。2021 年中半灌木、小半灌木的地上生物量

在中度放牧和重度放牧处理下分别达到了 3.81,4.14 g/m^2 ,均显著低于对照处理下的 6.62 g/m^2 ($p < 0.05$),降幅分别为 42.45% 和 37.46%。多年生杂类草的地上生物量在两年内均是在中度放牧和重度放牧处理下要显著低于对照处理($p < 0.05$),而一、二年生草本在两年内的各个处理之间均不存在显著差异(见表 2)。群落的 Simpson 优势度指数随放牧强度的增加在中

度和重度放牧处理下显著高于对照处理 ($p < 0.05$), 优势度指数分别为 0.83, 0.84。Shannon-Wiener 多样

性指数在中度放牧下最大, 其值为 2.22。Shannon-Wiener 多样性指数在各放牧处理之间差异不显著。

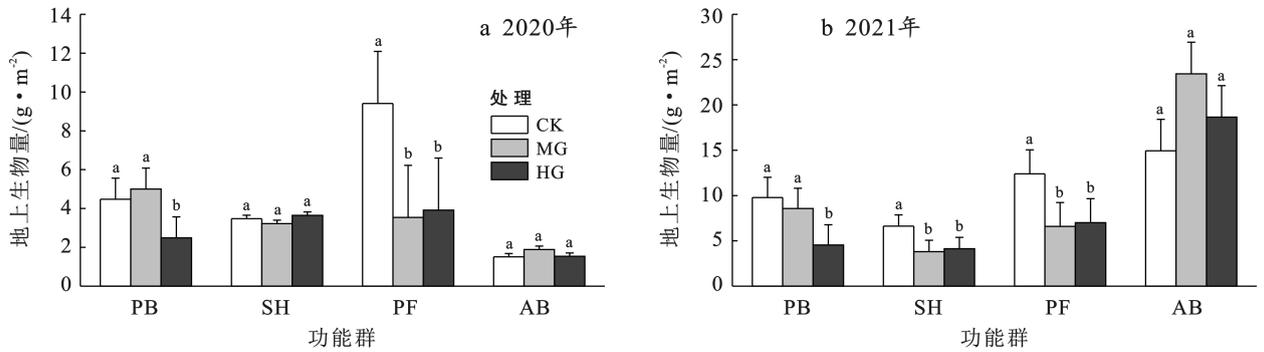


图 3 不同放牧强度下的功能群地上生物量

Fig.3 Aboveground biomass of functional groups under different grazing intensities

表 2 不同放牧强度群落多样性指数特征

Table 2 Characteristics of community diversity index at different grazing intensities

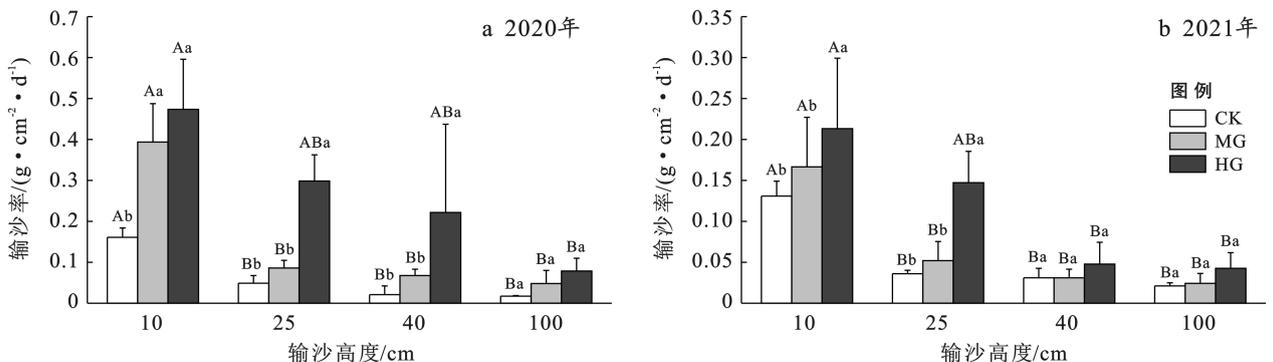
多样性指数	CK	MG	HG	F 值	p 值
Simpson 优势度指数	0.75 ± 0.09 ^b	0.83 ± 0.02 ^a	0.84 ± 0.01 ^a	9.806	0.007
Shannon-Wiener 多样性指数	1.66 ± 0.43 ^a	2.22 ± 0.86 ^a	1.95 ± 0.06 ^a	0.851	0.371

注:表中不同小写字母表示不同放牧处理之间多样性指数差异显著 ($p < 0.05$)

2.2 不同放牧强度对草地输沙率和输沙通量的影响

由图 4 可见,不同放牧处理之间的输沙率均随着输沙高度的上升而逐渐降低。各放牧处理下的输沙率在高度低于 40 cm 时,下降趋势明显。高度在 40—100 cm 之间,输沙率的下降趋势逐渐平稳。2020 年各放牧处理在距地面 10 cm 高度处的输沙率分别为 0.16, 0.39 和 0.47 g/(cm²·d); 25 cm 高度处的输沙率相较于 10 cm 处下降率分别为 68.75%, 76.92% 和 36.17%; 40 cm 高度处的输沙率相较于 10 cm 处下降率分别为 87.50%, 82.05% 和 53.19%; 100 cm 高度处的输沙率相较于 40 cm 处下降率分别达到了

17.98%, 28.70% 和 64.52%。2021 年各放牧处理在距地面 10 cm 处的输沙率分别为 0.13, 0.17 和 0.21 g/(cm²·d); 25 cm 高度处的输沙率相较于 10 cm 处下降率分别为 69.23%, 70.59% 和 28.57%; 40 cm 高度处的输沙率相较于 10 cm 处下降率分别为 84.61%, 82.35% 和 76.19%; 100 cm 高度处的输沙率相较于 40 cm 处下降率分别为 32.32%, 21.94% 和 10.61%。输沙高度低于 40 cm 时,输沙率均随放牧强度的增大显著升高 ($p < 0.05$)。随着高度的升高,输沙率在各放牧处理之间差异不显著。同一放牧处理下,随输沙高度上升输沙率显著降低 ($p < 0.05$)。



注:柱上不同小写字母表示各放牧处理间差异显著 ($p < 0.05$); 不同大写字母表示同一放牧处理输沙率在不同输沙高度差异显著 ($p < 0.05$)。

图 4 放牧对不同输沙高度输沙率的影响

Fig.4 Effects of grazing on sediment transport rate at different sediment transport heights

2020, 2021 年的输沙通量随放牧处理变化的趋势见图 5。2020 年输沙通量为 $2.46 \sim 30.07 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$, 随着放牧强度的增加呈现指数变化趋势 ($R^2 = 0.8349$); 2021 年输沙通量为 $3.31 \sim 11.26 \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$, 随着放牧强度的增加呈现线性变化趋势 ($R^2 = 0.9908$)。2020 年对照和轻度放牧处理的输沙通量低于 2021 年对照和轻度放牧处理的输沙通量, 而 2020 年重度放牧处理的输沙通量远高于 2021 年重度放牧处理的输沙通量, 是 2021 年输沙通量的 2.67 倍, 其原因有待于进一步分析。整体来看, 2020 和 2021 年的输沙通量变化趋势均为 $\text{HG} > \text{MG} > \text{CK}$ 。

2.3 功能群数量特征与输沙量之间的相关性

植物群落的高度和盖度对于近地面的输沙量影响最明显, 图 6 和图 7 分别就功能群的高度和盖度与输沙量之间的关系进行了拟合, 结果显示功能群的高度和盖度与输沙量之间的关系均呈现负相关指数关系。在功能群高度与输沙量的关系中, 相关性系数最高的是多年生杂类草 (PF), 其关系式为 $Y = 36.846 e^{-0.09x}$

$e^{-0.09x}$, $R^2 = 0.8804$; 在盖度与输沙量的关系中, 相关性系数最高的是—、二年生草本 (AB), 其关系式为 $Y = 25.695 e^{-0.71x}$, $R^2 = 0.8162$ 。整体来看, 功能群的高度与草地输沙量之间相关性要显著高于盖度, 且两者与草地输沙量之间的关系均达到了显著或极显著关系 ($p < 0.05$ 或 $p < 0.01$)。

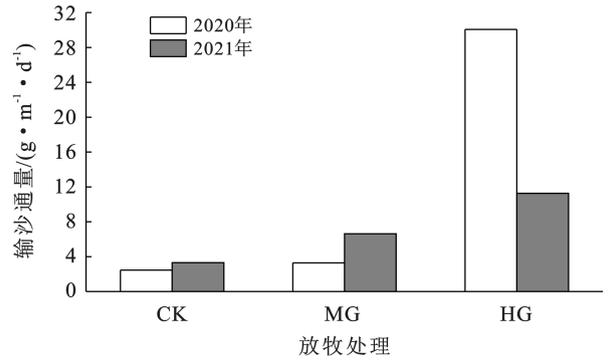


图 5 2020—2021 年放牧影响下的输沙通量变化
Fig.5 Change of sediment transport flux under influence of grazing in 2020—2021

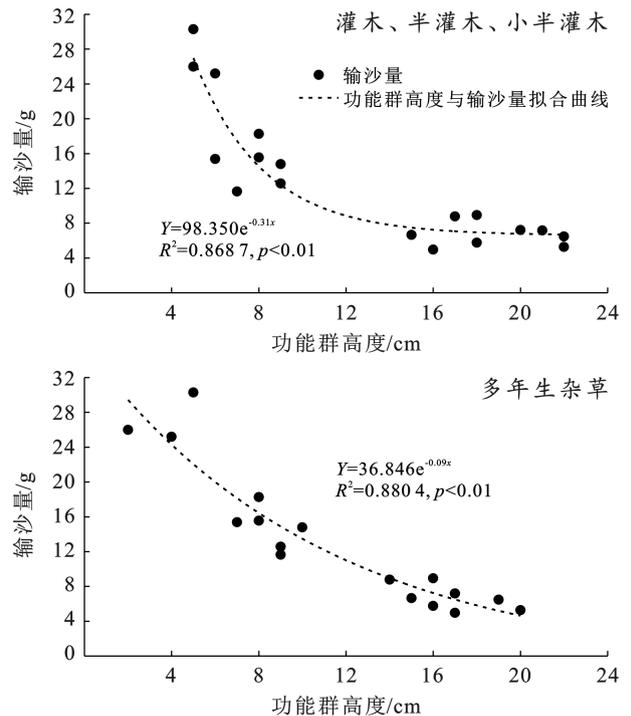
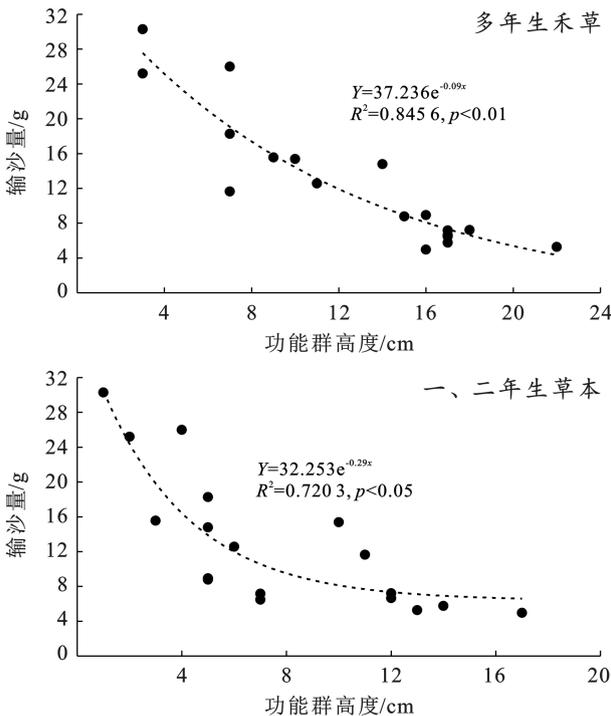


图 6 2020—2021 年放牧影响下的功能群高度与输沙量关系

Fig.6 Relationship between functional group height and sediment transport under influence of grazing in 2020—2021

图 8 分别对不同放牧强度下各功能群的地上生物量与近地面 10 cm 高度处的输沙量进行相关性拟合, 结果表明两者呈现负相关指数关系, 他们的关系式分别为多年生禾草 (PB): $Y = 33.175 e^{-0.13x}$, $R^2 = 0.8222$; 半灌木、小半灌木 (SH): $Y = 29.891 e^{-0.36x}$, $R^2 = 0.5917$; 一、二年生草本 (AB): $Y = 22.233$

$e^{-0.46x}$, $R^2 = 0.6451$; 多年生杂类草 (PF): $Y = 21.573 e^{-0.16x}$, $R^2 = 0.7875$ 。通过对各功能群地上生物量与近地面输沙量的相关性拟合可以看出, 它们的相关性大小依次是多年生禾草 > 多年生杂类草 > 一、二年生草本 > 半灌木、小半灌木, 且各功能群与草地输沙量之间的关系均达到显著水平 ($p < 0.05$)。

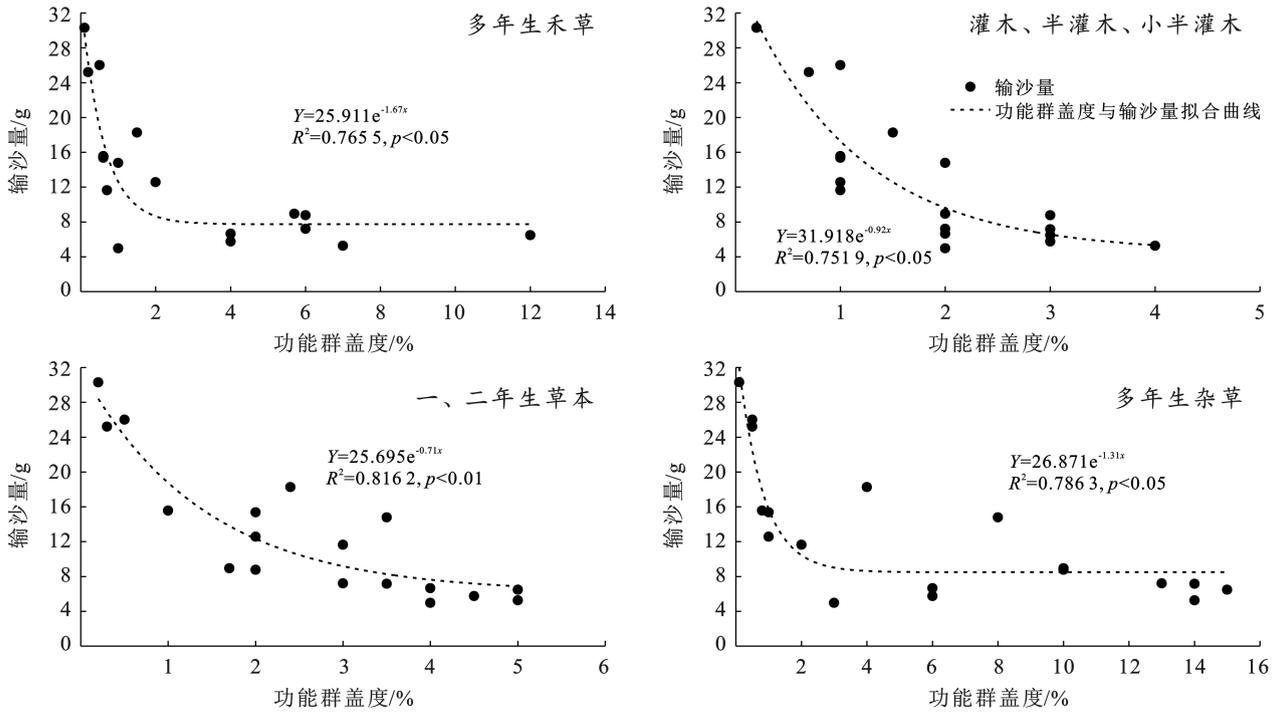


图 7 2020—2021 年放牧影响下的功能群盖度与输沙量关系

Fig.7 Relation between functional group coverage and sediment transport under influence of grazing in 2020—2021

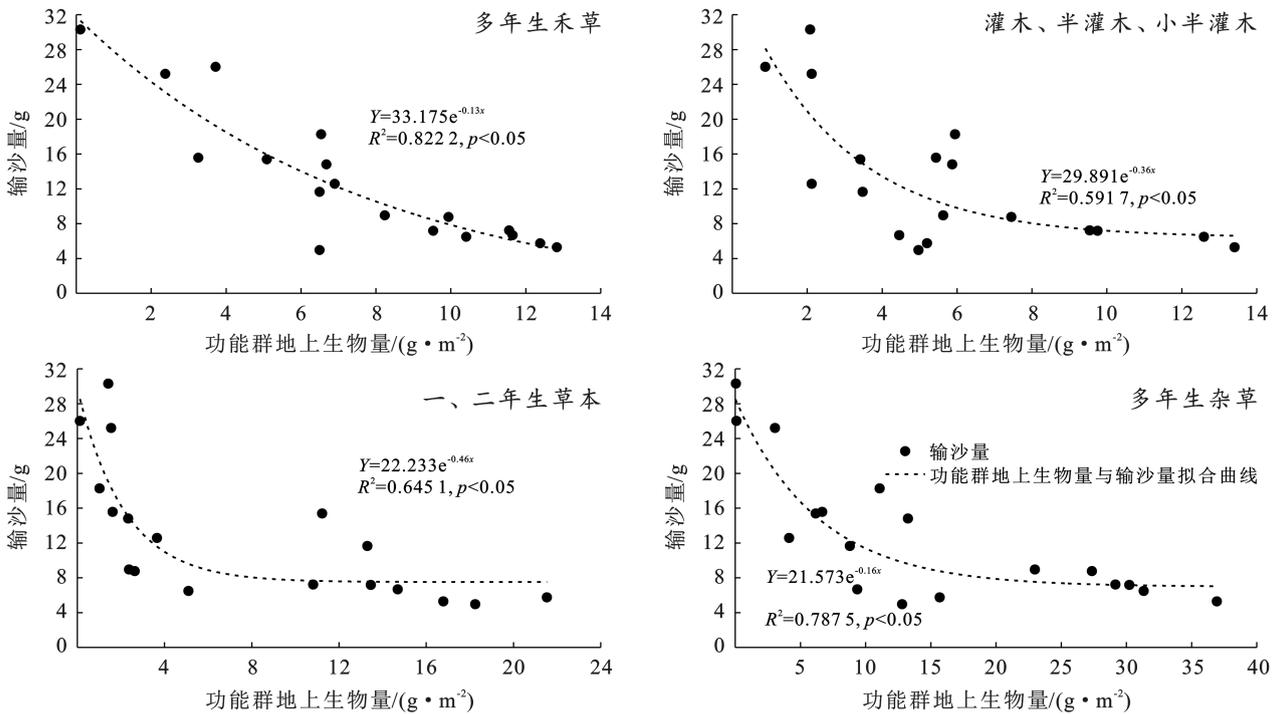


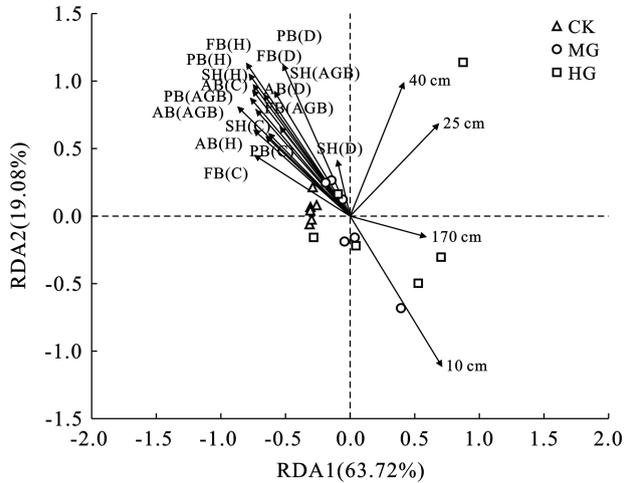
图 8 2020—2021 年放牧影响下的功能群地上生物量与输沙量关系

Fig.8 Relationship between aboveground biomass and sediment transport in functional groups under influence of grazing in 2020—2021

由图 9 可见,以各功能群数量特征为解释变量,不同输沙高度输沙量为响应变量。通过冗余分析(RDA)探究不同输沙高度输沙量和功能群特征的关系,RDA 分析的结果表明:第一、二排序轴的累计解释率分别达到了 63.72%和 19.08%,该解释率说明功

能群特征可以很好地解释不同输沙高度的输沙量的变化,而且主要由第一排序轴决定。从图 9 中可以看出,距离地面 10 cm 高度处的输沙量与各功能群特征呈现负相关关系,即随着各功能群的高度、盖度、密度和生物量降低,近地面输沙量增多,结合上面功能群

特征与输沙量相关性可以看出,功能群高度对输沙量的影响最大,尤其是多年生禾草和多年生杂草的高度与输沙量的关系显著性最大。



注:图中括号中的字母;C为功能群盖度;D为功能群密度;H为功能群高度;AGB为功能群地上生物量。

图 9 不同输沙高度输沙量与功能群特征的冗余分析
Fig.9 Redundancy analysis of sediment transport quantity and functional group characteristics at different sediment transport heights

3 讨论

3.1 放牧对功能群数量特征及地上生物量的影响

放牧过程会导致耐牧物种增加、不耐牧物种减少的群落演替,不同放牧处理下群落的数量特征会发生显著变化。牲畜的采食践踏影响草地植被的群落特征。本研究中,放牧显著降低了荒漠草原各功能群的高度、盖度和地上生物量。适当的放牧使群落 Simpson 优势度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数在短期内有明显上升。在放牧过程中,家畜会优先选择采食较高多年生禾草,因此,随着放牧强度的增大,多年生禾草的高度和盖度下降最明显。随着放牧强度的增大,由于多年生禾草的高度下降,牲畜开始取食其他功能群的植物,导致其他功能群的高度和盖度也随之下降。另外,放牧使得耐牧型物种增多,它们能够适应高强度的放牧环境。胡静等^[21]研究发现适度放牧对根茎禾草的高度影响较大,对丛生禾草高度影响较小,这与本研究的结果相似。灌木、半灌木由于自身纤维含量高,适口性差,在群落中比较稳定,其高度、盖度、密度和地上生物量在中度放牧和重度放牧处理下不显著^[22]。另外,放牧引起原有草地植被群落结构被破坏,一些适口性差的植物会得到生长机会,短期内群落的生物多样性会有明显上升^[23]。

植物地上生物量是衡量草地健康和草原生态系统稳定性的重要指标^[24-25]。本研究发现,放牧显著降

低了各功能群的地上生物量,尤其多年生禾草的地上生物量下降最明显。在放牧过程中,牲畜会采食植株的地上部分,造成植物的地上生物量下降^[26]。放牧降低了群落的高度、盖度、密度和地上生物量,使得土壤地表裸露,加快了土壤风蚀过程,进而使得群落的地上生物量降低^[23]。

3.2 放牧强度对输沙率和输沙通量的影响

过度放牧是导致草地退化的主要原因之一,荒漠草原由于自身气候条件属于干旱半干旱气候,降水量少,植被盖度低,因此具有风大沙多的特点,放牧和风蚀共同作用加剧了草地的退化速度。研究表明,放牧强度的变化与风沙沉积物之间存在密切关系。风蚀过程作为一种常见的自然现象,涉及到风蚀因子的许多方面,但是不同的土地利用方式对风蚀因子的影响是人类管理生态系统风蚀变化的主要原因^[6]。放牧导致植被的覆盖度下降是影响风沙沉积物增多的主要原因之一。在非洲的 Kalahari 荒漠, Wiggs G.F.S. 等^[27]通过研究放牧对植被盖度的影响时发现,当植被覆盖度下降 60% 时,近地面的风速会增加 200%;放牧降低了植被盖度,破坏了表层土壤结构,加快了风蚀速度,从而增加了风沙沉积物的积累。

本研究发现不同高度的输沙率均随着放牧强度的增大而增大。另外,各功能群的高度、盖度及地上生物量均能有效降低草地输沙通量。孙世贤等^[6]在短花针茅荒漠草原的研究表明,随放牧强度的增强,风沙流输沙通量逐渐增加。中度放牧处理的草地输沙量比重度放牧处理降低了 45.16%。本研究也得到了类似的结果,证明过度放牧会显著增加草地输沙量。

3.3 功能群特征变化对草地输沙量的影响

放牧作为荒漠草原地区主要的草地利用形式,直接会对土壤和植被造成破坏。随着强度的增加,过度放牧会导致草地严重退化。有研究表明防风固沙的植被盖度在 24%~34% 之间,地表植被增大了空气动力学粗糙度^[23],在相同风速下,随着植被盖度的增加,风蚀量呈阶梯式下降,在盖度为 27%~43% 时最剧烈^[28]。由于植被盖度和地面粗糙度的增加,降低了风沙流和地表的接触机会,大大降低了近地面风速^[29]。

若山古丽·芒力克等^[30]研究发现林地的土壤风蚀和植被高度之间存在显著负相关关系,本文中关于功能群高度与草地输沙量之间的关系的结果与此相同。本研究通过对功能群特征与草地输沙量的相关性分析以及不同功能群特征与草地输沙量的冗余分析之后认为功能群高度对草地近地面输沙量的影响

比其他数量特征更大,尤其是多年生禾草和多年生杂类草的高度变化对输沙量的影响更显著。本研究还对不同放牧处理下各功能群的生物量与草地输沙量的关系进行分析,初步找到各生物量与输沙量之间均为负相关指数关系。中度放牧条件下各功能群的地上生物量分别为多年生禾草 5.00 g/m^2 ,半灌木、小半灌木 3.22 g/m^2 ,多年生杂类草 3.54 g/m^2 ,一二年生草本 1.89 g/m^2 ,基本上能够很好地促进生态效益和经济效益最大化。相关研究认为输沙量随着植被盖度和表层土壤含水量的增加呈指数形式减少,而且当植被盖度增加到 20% 以上时,可以明显降低输沙量^[31],本研究与此结论类似。通过本研究可以看出,各功能群地上生物量增加能有效降低草地输沙量,起到防风固沙作用。本研究得出多年生禾草地上生物量的增加对草地输沙量的降低效果最显著,因此可以得出多年生禾草在降低地表风速中起着重要作用^[32]。李永强等^[13]研究认为放牧导致的株丛结构和群落结构决定的侧影盖度的变化对风蚀过程的影响最大,尤其是风沙沉积量。因此,在未来的研究中应该更多地考虑放牧和株丛结构的耦合效应,以便深入揭示荒漠草原风蚀过程对放牧管理的响应机制。

4 结论

(1) 随着放牧强度的增强,各功能群内物种的高度、盖度和地上生物量基本呈现下降态势。适当放牧能显著提高 Simpson 优势度指数和 Shannon-Wiener 多样性指数。

(2) 各放牧处理间的草地输沙量差异显著,不同输沙高度处的草地输沙量变化规律均为 $HG > MG > CK$;同一放牧处理下,随输沙高度上升输沙率显著降低;各功能群高度和盖度与输沙量均存在负指数相关关系,其中多年生禾草和多年生杂类草的高度变化对输沙量的影响更显著。各功能群的地上生物量与输沙量存在负相关指数关系。其中,多年生禾草的生物量与输沙量的拟合程度最高。

(3) 过度放牧会显著影响功能群特征并降低草地的防风固沙能力,因此建议把放牧强度控制在中度及以下才能提高草地生态系统防风固沙能力。

[参 考 文 献]

- [1] Pimentel D, Kounang N. Ecology of soil erosion in ecosystems [J]. *Ecosystems*, 1998,1(5):416-426.
- [2] Li Junran, Okin G S, Epstein H E. Effects of enhanced wind erosion on surface soil texture and characteristics of windblown sediments [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009,114:G02003.
- [3] 王磊,宋乃平,陈林,等. 荒漠草原土壤粗质化和养分减少伴随多年生群落转变为一年生群落[J]. *草业学报*, 2020,29(11):183-189.
- Wang Lei, Song Naiping, Chen Lin, et al. Increase in soil coarse sand content and decrease in soil nutrient levels accompany the transformation of perennial communities to annual communities in desert grass-land [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020,29(11):183-189.
- [4] 杜世丽,马玉寿,李世雄,等. 春季放牧对祁连山草原化草甸植物群落特征的影响[J]. *草业科学*, 2022,39(10):2062-2073.
- Du Shili, Ma Yushou, Li Shixiong, et al. Effects of spring grazing on vegetation community characteristics of alpine steppe-meadow in the Qilian Mountains [J]. *Pratacultural Science*, 2022,39(10):2062-2073.
- [5] 刘佳佳,黄甘霖. 锡林郭勒盟和锡林浩特市草原生态系统服务与人类福祉的关系研究综述[J]. *草业科学*, 2019,36(2):573-593.
- Liu Jiajia, Huang Ganlin. A review of grassland ecosystem service and human well-being in Xilingol League and Xilinhot City [J]. *Pratacultural Science*, 2019,36(2):573-593.
- [6] 孙世贤,丁勇,李夏子,等. 放牧强度季节调控对荒漠草原土壤风蚀的影响[J]. *草业学报*, 2020,29(7):23-29.
- Sun Shixian, Ding Yong, Li Xiazi, et al. Effects of seasonal regulation of grazing intensity on soil erosion in desert steppe grassland [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020,29(7):23-29.
- [7] 贺晶,吴新宏,杨婷婷,等. 浑善达克沙地植被生长季流沙地及其接壤草地的沙物质粒径组成[J]. *干旱区资源与环境*, 2015,29(1):95-99.
- He Jing, Wu Xinhong, Yang Tingting, et al. The sand grain diameter composition of quicksand and its contiguous grassland in Hunshandake sandy land in growth season [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015,29(1):95-99.
- [8] 翟辉,李国荣,李进芳,等. 黄河源鼠害退化区鼠丘土壤的风蚀特征[J]. *水土保持通报*, 2022,42(6):97-105.
- Zhai Hui, Li Guorong, Li Jinfang, et al. Wind erosion characteristics of rodent mounds at a degraded area in source area of Yellow River [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022,42(6):97-105.
- [9] 陈首序,董玉祥. 风蚀气候侵蚀力研究进展[J]. *中国沙漠*, 2020,40(5):65-73.
- Chen Shouxu, Dong Yuxiang. A review of the research on wind erosion climatic erosivity [J]. *Journal of Desert Research*, 2020,40(5):65-73.
- [10] 程锋梅,李生宇,郑伟,等. 3 类典型株型草本植物对沙面风蚀抑制作用的研究[J]. *干旱区研究*, 2022,39(5):

- 1526-1533.
- Cheng Fengmei, Li Shengyu, Zheng Wei, et al. Study on wind erosion inhibition of three typical herbaceous plants on sand surface [J]. *Arid Zone Research*, 2022, 39(5):1526-1533.
- [11] 张振超. 青藏高原典型高寒草地地上一地下的退化过程和禁牧恢复效果研究[D].北京:北京林业大学,2020.
- Zhang Zhenchao. The above-and below-ground processes of degradation and restoring efficiency of grazing exclusion in typical alpine grasslands on the Tibetan Plateau [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [12] 丁延龙, 蒙仲举, 高永, 等. 荒漠草原风蚀地表颗粒空间异质特征[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(2):59-64.
- Ding Yanlong, Meng Zhongju, Gao Yong, et al. Heterogeneity of soil particles in wind erosion surface of desert steppe [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(2):59-64.
- [13] 李永强, 李治国, 董智, 等. 内蒙古荒漠草原放牧强度对风沙通量和沉积物粒径的影响[J]. *植物生态学报*, 2016, 40(10):1003-1014.
- Li Yongqiang, Li Zhiguo, Dong Zhi, et al. Effects of grazing intensity on windblown sediment mass flux and particle size distribution in the desert steppe of Nei Mongol, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2016, 40(10):1003-1014.
- [14] 王德利, 王岭. 草地管理概念的新释义[J]. *科学通报*, 2019, 64(11):1106-1113.
- Wang Deli, Wang Ling. A new perspective on the concept of grassland management [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(11):1106-1113.
- [15] 古琛, 杜宇凡, 乌力吉, 等. 载畜率对荒漠草原群落及植物功能群生物量的影响[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(12):1962-1968.
- Gu Chen, Du Yufan, Wu Liji, et al. Effects of stocking rates on the biomass of desert steppe community and plant functional group [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(12):1962-1968.
- [16] 张博涵, 吕世杰, 屈志强, 等. 不同载畜率下荒漠草原生长季地表特征及对风沙通量的影响[J]. *中国草地学报*, 2023, 45(4):33-41.
- Zhang Bohan, Lü Shijie, Qu Zhiqiang, et al. Effects of stocking rates on land surface characteristics and wind-blown sand fluxes during growing season in desert steppe [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45(4):33-41.
- [17] 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.
- [18] 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(英文)[J]. *中国草地*, 2000, (6):2-6.
- Wei Zhijun, Han Guodong, Yang Jing, et al. The response of *Stipa breviflora* community to stocking rate [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2000, (6):2-6.
- [19] 朱趁趁, 龚吉蕊, 杨波, 等. 内蒙古荒漠草原防风固沙服务变化及其驱动力[J]. *生态学报*, 2021, 41(11):4606-4617.
- Zhu Chenchen, Gong Jirui, Yang Bo, et al. Changes of windbreak and sand fixation services and the driving factors in the desert steppe, Inner Mongolia [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(11):4606-4617.
- [20] 朱震达, 吴正, 刘恕. 中国沙漠概论[M].北京:科学出版社,1980:93-105.
- Zhu Zhenda, Wu Zheng, Liu Shu. Introduction to the Desert in China [M]. Beijing: Science Press, 1980:93-105.
- [21] 胡静, 侯向阳, 萨茹拉, 等. 大针茅对放牧生态系统植物群落地上生物量的调控作用[J]. *草地学报*, 2016, 24(1):1-11.
- Hu Jing, Hou Xiangyang, Sa Rula, et al. Regulatory effects of *Stip grandis* on above-ground Biomass of plant community in grazing ecosystem [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2016, 24(1):1-11.
- [22] 周睿, 宋梅玲, 王玉琴, 等. 不同放牧方式下防除黄帚橐吾对高寒草地植物群落的影响[J]. *草地学报*, 2022, 30(7):1819-1828.
- Zhou Rui, Song Meiling, Wang Yuqin, et al. Effects of *Ligularia virgaurea* control on plant community of grassland under different grazing modes [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(7):1819-1828.
- [23] 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.
- Zhao Liya, Zhong Hanshan, Zhao Meiyu, et al. Effect of enclosure and grazed management on aboveground biomass and species diversity in sandy grasslands of Horqin sandy land, Eastern Inner Mongolia, China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(10):1783-1790.
- [24] 柴永福, 岳明. 植物群落构建机制研究进展[J]. *生态学报*, 2016, 36(15):4557-4572.
- Chai Yongfu, Yue Ming. Research advances in plant community assembly mechanisms [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(15):4557-4572.

- [25] 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.
Zhang Feng, Yang Yang, Qiao Jirong, et al. Effects of utilization ways on species diversity, functional traits and aboveground biomass in *Stipa grandis* steppe [J]. Chinese Journal of Grassland, 2019,41(1):1-8.
- [26] 邹学勇,张春来,程宏,等. 土壤风蚀模型中的影响因子分类与表达[J]. 地球科学进展,2014,29(8):875-889.
Zou Xueyong, Zhang Chunlai, Cheng Hong, et al. Classification and representation of factors affecting soil wind erosion in a model [J]. Advances in Earth Science, 2014,29(8):875-889.
- [27] Wiggs G F S, Livingstone I P, Thomas D S G, et al. Effect of vegetation removal on airflow patterns and dunedynamics in the Southwest Kalahari desert [J]. Land Degradation and Development, 1994,5,13-24.
- [28] 余沛东,陈银萍,李玉强,等. 植被盖度对沙丘风沙流结构及风蚀量的影响[J]. 中国沙漠,2019,39(5): 29-35.
Yu Peidong, Chen Yinping, Li Yuqiang, et al. Influence of vegetation coverage on sand flow structure and wind erosion yield with wind tunnel experiment as a case [J]. Journal of Desert Research, 2019,39(5): 29-35.
- [29] 吴汪洋,张登山,田丽慧,等. 青海湖沙地人工治理沙丘的风速廓线变化特征[J]. 水土保持研究,2013,20(6): 162-167.
Wu Wangyang, Zhang Dengshan, Tian Lihui, et al. Variable characteristics of wind profile of the artificial sand dune in sandy land around the Qinghai lake [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013,20(6): 162-167.
- [30] 若山古丽·芒力克,阿丽亚·拜都热拉,蔡凯旭,等.新疆托克逊县不同配置防护林的防风蚀效能[J].水土保持通报,2021,41(6):43-47,56.
Manglike Ruoshanguli, Baidourela Aliya, Cai Kaixu, et al. Wind erosion effects of different shelterbelts in Toksun County, Xinjiang Wei Autonomous Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(6):43-47,56.
- [31] 杨钦,郭中领,王仁德,等. 河北坝上不同土地利用方式对土壤风蚀的影响[J]. 干旱区资源与环境,2017,31(2):185-190.
Yang Qin, Guo Zhongling, Wang Rende, et al. Influence of different land uses on soil wind erosion in Bashang area, Hebei, China [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017,31(2):185-190.
- [32] 姜丽霞,田贻,刘新月,等.不同放牧方式对草地群落植物功能群组成和结构的影响[J]. 北京林业大学学报,2022,44(1):77-86.
Jiang Lixia, Tian Yun, Liu Xinyue, et al. Effects of different grazing methods on the composition and structure of plant functional groups in grassland community [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022,44(1):77-86.
- [26] 焦若禹,宋孝玉,赵新凯,等.黄土沟壑区黑麦草植被冠层与根系坡面水沙效益及水力特性[J].干旱区地理,2022,45(1):208-218.
Jiao Ruoyu, Song Xiaoyu, Zhao Xinkai, et al. Water and sediment benefit and hydraulic characteristics of ryegrass vegetation in loess gully region [J]. Arid Land Geography, 2022,45(1):208-218.
- [27] 王葆,程金花,王文凯,等.北京北部褐土区 2 种典型植物措施减流减沙效应[J].水土保持学报,2017,31(3): 56-61,68.
Wang Bao, Cheng Jinhua, Wang Wenkai, et al. Effect of two typical plant measures on sediment and flow reduction in Northern Beijing brownsoil area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017,31(3):56-61,68.
- [28] 管玉亭,奚同行,吴治玲,等.不同植物配置模式对人工边坡减流减沙效益的影响[J].水土保持通报,2022,42(3):1-7,22.
Zan Yuting, Xi Tonghang, Wu Zhiling et al. Effects of different plant allocation patterns on the efficiency of flow and sediment reduction in artificial slope [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(3):1-7,22.
- [29] 刘纪根,张昕川,李力,等.紫色土坡面植被覆盖度对水土流失影响研究[J].水土保持研究,2015,22(3):16-20,27.
Liu Jigen, Zhang Xinchuan, Li Li, et al. Study on the effect of vegetation coverage on soil erosion on purple slope [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015,22(3):16-20,27.
- [30] 张益凡,赵庆合,曹子豪,等.抑制植被对径流和泥沙产量的影响[J]. Sustainability, 2019,11(13):3685.

(上接第 28 页)