

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.01.033; CSTR:32311.14.rswc.2025.01.033.

王益涛, 刘建康, 武志嘉, 等. 围封对荒漠草原典型植物群落特征及多样性的影响[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 121-130, 140.

Wang Yitao, Liu Jiankang, Wu Zhijia, et al. Impact of enclosure on characteristics diversities of typical vegetation communities in desert grasslands[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 121-130, 140.

围封对荒漠草原典型植物群落特征及多样性的影响

王益涛^{1,2,3}, 刘建康^{1,2,3}, 武志嘉⁴, 张博华⁴, 兰慧琴^{1,2,3}, 黄祥祥⁴

(1. 宁夏大学 生态环境学院, 银川 750021; 2. 西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021;

3. 西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 银川 750021; 4. 宁夏大学 林业与草业学院, 银川 750021)

摘 要: [目的] 揭示围封对荒漠草原典型植物群落特征及多样性的影响, 可为宁夏荒漠草原植物资源保护、生物多样性保育、草地资源可持续利用与管理提供科学依据。 [方法] 以宁夏荒漠草原分布广泛的猪毛蒿 (*Artemisia scoparia*)、短花针茅 (*Stipa breviflora*)、苦豆子 (*Sophora alopecuroides*) 和油蒿 (*Artemisia ordosica*) 4 种典型植物群落为研究对象, 研究围封措施对不同植物群落结构和功能特征的影响。 [结果] 围封不会改变 4 种植物群落中建群种优势地位, 但改变了其功能群物种组成及重要值; 围封增加了一年生植物 (猪毛蒿) 群落内物种总数 (增幅为 13.33 %), 但降低了多年生植物 (短花针茅、苦豆子、油蒿) 群落内物种总数 (降幅分别为 30 %, 34.78 % 和 40 %), 降低了 4 种植物群落中多年生杂类草物种数量, 并增加了多年生植物群落中多年生杂草和多年生禾草的重要值; 围封增加了 4 种植物群落的高度和地上生物量, 并增加了猪毛蒿、短花针茅和油蒿群落的盖度, 降低了 4 种植物群落的 Margalef 丰富度指数, 多年生草本植物 (短花针茅、苦豆子) 群落的 Shannon-Wiener 和 Simpson 指数, 但增加了一年生植物群落的 Shannon-Wiener, Simpson 和 Pielou 指数; 从群落建群种生活型角度分析, α 多样性整体表现为多年生草本 > 半灌木 > 一年生草本植物群落; 地上生物量与盖度、高度呈极显著正相关关系 ($p < 0.001$), 与 Margalef 丰富度指数呈极显著负相关关系 ($p < 0.001$), 与 Shannon-Wiener 指数呈显著负相关关系 ($p < 0.05$)。 [结论] 围封可通过改变不同植物群落物种组成对群落的盖度、高度及地上生物量产生积极影响, 但不同植物群落的多样性特征对围封措施的敏感性存在差异。

关键词: 围封; 荒漠草原; 典型群落; 群落特征; 地上生物量

中图分类号: S812.6

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)01-0121-10

Impact of enclosure on characteristics diversities of typical vegetation communities in desert grasslands

Wang Yitao^{1,2,3}, Liu Jiankang^{1,2,3}, Wu Zhijia⁴, Zhang Bohua⁴, Lan Huiqin^{1,2,3}, Huang Xiangxiang⁴

(1. College of Ecology and Environments, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystems in Northwestern China of Ministry of Education, Yinchuan 750021, China; 3. Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwestern China, Yinchuan 750021, China; 4. College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: [Objective] This study aims to elucidate the impact of enclosure on the characteristics and diversity of typical plant communities in desert grasslands, to provide scientific evidence for the conservation of plant resources, biodiversity, and the sustainable utilization and management of grassland resources in Ningxia desert grasslands. [Methods] Four typical plant communities, including *Artemisia scoparia*, *Stipa breviflora*, *Sophora alopecuroides*, and *Artemisia ordosica*, widely distributing in the desert grasslands of Ningxia, were selected as research objects to investigate the impact of enclosure measures on the structure and functional characteristics of different plant communities. [Results] Enclosure did not alter the dominant

收稿日期: 2024-04-25

修回日期: 2024-05-12

资助项目: 国家自然科学基金项目 (32360280; 32001117); 2023 年自治区全职引进高层次人才科研启动项目 (2023BSB03022)

第一作者: 王益涛 (1997—), 男, 贵州遵义市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail: 1719168661@qq.com

通信作者: 刘建康 (1988—), 男, 山东寿光市人, 博士, 副研究员, 主要从事土地退化与荒漠化防治研究。E-mail: liujiankang1989@126.com

http://stbcyj.paperonce.org

status of key species in the four plant communities but changed their functional group composition and importance values. Enclosure increased the total number of species in the annual plant community (*Artemisia scoparia*) by 13.33% but decreased the total number of species in perennial plant communities (*Stipa breviflora*, *Sophora alopecuroides*, *Artemisia ordosica*) by 30%, 34.78%, and 40%, respectively. It reduced the number of perennial miscellaneous grass species in all four plant communities and increased the importance values of perennial miscellaneous grasses and perennial graminoids in perennial plant communities. Enclosure increased the height and aboveground biomass of the four plant communities and increased the canopy cover of *Artemisia scoparia*, *Stipa breviflora*, and *Artemisia ordosica* communities. Enclosure decreased the Margalef richness index of all four plant communities, the Shannon-Wiener and Simpson indices of perennial herbaceous plant communities (*Stipa breviflora*, *Sophora alopecuroides*), but increased the Shannon-Wiener, Simpson, and Pielou indices of the annual plant community. From the perspective of the analysis on life form of key species in the communities, alpha diversity showed the order: perennial herbaceous > subshrub > annual herbaceous plant communities. Aboveground biomass was significantly positively correlated with canopy cover and height ($p < 0.001$), and significantly negatively correlated with the Margalef richness index ($p < 0.001$) and the Shannon-Wiener index ($p < 0.05$). [Conclusion] Enclosure can positively influence the canopy cover, height, and aboveground biomass of communities by altering the species composition of different plant communities. However, the sensitivity of diversity characteristics of different plant communities to enclosure measures varies.

Keywords: enclosure; desert grasslands; typical communities; community characteristics; aboveground biomass

围封是退化草地生态修复的一种重要技术手段,对草原生态系统的恢复和重建具有重要意义^[1]。围封是指人类有意识地利用铁丝、塑木等材料对退化草地采取管护的措施,因其实施简单、投资少、面积广、时间充分等特性而被广泛应用^[2]。草地围封可调整草食动物与植被间的关系,有效消除牲畜踩踏、采食等破坏行为,为种子萌发、生长创造了良好的环境,进而促进退化草地植被恢复^[3-4]。由于不同植物生物学特性及其对环境需求的差异,草地围封植物群落物种组成发生变化^[5]。有研究指出,围封可增加禾草科、豆科、藜科等适口性植物在群落中的比重,降低杂类草和一年生草本植物比重,增加植物群落物种多样性,进而促进草地生态系统稳定与恢复^[6]。然而有研究指出,草地长期围封后植物群落结构逐渐趋于简单,群落多样性下降^[7]。在多种因素驱动下(围封年限、草原类型、气候条件、土壤质地等),草地围封对植物群落结构、功能特征的影响存在差异,导致草地的恢复效果表现不一^[8]。

近年来,在全球气候变化、人类活动加剧等背景下,草地植被正面临退化严重,已成为干旱和半干旱地区最显著的生态环境问题之一^[9]。荒漠草原作为草原中最干旱的植被类型,其植被稀疏,土壤贫瘠,对环境变化较为敏感,是生态学领域的研究热点区域^[10]。我国荒漠草原广泛分布于西北地区,其面积约占国土总面积的 1/5,宁夏荒漠草原主要分布于宁夏中东部,约占全区

草原面积的 55%,是当地草原的主体^[11]。在不合理放牧驱动下,目前该地区约有 97.00% 的草地面临不同程度的荒漠化,其中重度荒漠化草地约占 50%^[12]。主要表现为植物覆盖度下降、高度降低、生产力下降、植被空间格局发生变化等^[13]。这严重影响草地生态系统的生物多样性和稳定性,限制了社会、经济和生态环境的可持续发展^[14]。

目前,已有大量研究报道围封对草地生态系统群落特征的影响,这些研究主要集中在温性草原、高山草甸、高寒草甸等^[6,15],但在干旱和半干旱地区的研究相对较少^[9],尤其是对宁夏荒漠草原区,不同植物群落数量特征及多样性如何响应围封的相关研究鲜见报道。因此,本研究综合考虑牲畜干扰和群落类型两个因素,以宁夏荒漠草原围封和放牧草地的猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)、油蒿(*Artemisia ordosica*) 4 种植物群落为研究对象,研究不同植物群落物种组成、重要值、地上生物量、植物多样性等特征指标,分析围封对不同群落结构及功能特征的影响,以期对宁夏荒漠草原及类似地区植物资源保护、生物多样性保育、草地资源可持续利用与管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于宁夏东部盐池县境内(106°30′—

107°47'E, 37°04'—38°10'N), 地处干旱与半干旱气候过渡带, 属于典型的中温带大陆气候。该地区四季少雨多风, 气候干燥, 年平均气温为 8.1 °C, 月平均最高气温为 20.6 °C, 月平均最低气温为 -5.1 °C。该地区年降水量较少, 为 250~350 mm, 而蒸发量较大, 约为 2 000 mm, 光照资源丰富, 年日照时数达 2 892.1 h。土壤类型以风沙土为主, 其次分布有淡灰钙土, 土壤结构松散, 肥力较低。植物类型以旱生和中旱生草本植物、半灌木为主, 呈斑块化分布, 主要代表物种有油蒿、猪毛蒿、短花针茅、苦豆子、牛枝子(*Lespedeza potaninii*)、猫头刺(*Oxytropis aciphylla*)、阿尔泰狗娃花(*Aster altaicus*)、披针叶黄华(*Thermopsis lanceolata*)、赖草(*Leymus secalinus*)等。

1.2 样地选取

以研究区内分布较为广泛的猪毛蒿(一年生植物)、短花针茅(多年生草本)、苦豆子(多年生草本)、油蒿(多年生半灌木)4 种典型植物群落为研究对象(表 1), 在研究区内选择地势相对平坦的连续地段, 依据有无牲畜干扰在每种植物群落分布区内选择围封及自由放牧两种草地。在每种草地内分别建立一个 50 m×50 m 的样地, 共设置 8 块样地, 并在每个样地内随机布设 3 个 1 m×1 m 的小样方, 样方间距大于 10 m。4 个围封草地均于 2018 年开始在外围用铁丝网及水泥桩设置围栏, 以杜绝大型牲畜食草及小型食草动物(如鼠、兔等)活动的影响, 不同草地在进行围栏封育之前均受当地传统放牧的影响, 与所选自由放牧样地距离较近, 其受干扰程度、土壤条件、气候条件等基本类似; 而自由放牧草地不设置任何保护措施, 样地仍受当地传统放牧的影响。本研究所有布设样地位置远离公路, 以最大程度减小道路对本研究结果的影响。

表 1 4 种典型植物群落概况

Table 1 Overview of four typical plant communities

群落 类型	经度 E	纬度 N	海拔/ m	土壤 类型	生活型
ASC	107°24'	37°50'	1387.10	风沙土	一年生植物
SBC	107°20'	37°43'	1406.25	灰钙土	多年生植物
SAC	107°08'	37°43'	1508.84	风沙土	多年生植物
AOC	107°07'	37°45'	1514.70	风沙土	半灌木

注: ASC 代表猪毛蒿群落; SBC 代表短花针茅群落; SAC 代表苦豆子群落; AOC 代表油蒿群落。下同。

1.3 样方调查与采样

1.3.1 植物群落特征调查 于 2022 年植物生长旺季(8 月)采用样方法对不同样地进行植物群落调查, 以获取包括物种名称、物种数、高度、盖度、多度等在内的群落特征指标, 具体计量方法如下:

物种数: 采用计数法。在样方框内以种为单位记录物种的数量。

高度测定: 采用卷尺测量法。在样方框内, 每种植株随机选取 10 株, 用卷尺测量其自然高度, 计算平均值。若样方框内某一植株的数量不足 10 株, 则将其全部测量, 根据其株数计算平均值即可。

盖度测定: 采用网格法。将 1 m×1 m 的样方框分为 100 个 0.1 m×0.1 m 的网格, 每个网格代表 1% 的盖度, 将样方框水平放入样方中, 物种所占网格的数量(覆盖超过 1/2 以上计为 1%), 对各物种分盖度及总盖度进行测定。

多度测定: 采用计数法。以株为单位记录不同植株的数量。

1.3.2 地上生物量的测定 地上生物量(Above-ground biomass, AGB)采用收获法, 在群落调查完成后, 用枝剪对 1/2 样方框内的所有植物齐地刈割, 装入信封带回实验室, 在 65 °C 下持续烘干 48 h, 烘干后称干重, 作为群落地上生物量。

1.3.3 植物群落功能群的划分 根据植物群落的生活型组成, 将其功能群^[16]划分为一年生杂类草(Annual forbs, AF)、多年生禾草(Perennial grasses, PG)、多年生杂类草(Perennial forbs, PF)、半灌木(Subshrub, SB)。

1.4 数据处理和统计分析

1.4.1 重要值计算 对小样方内不同植物的盖度、高度、密度进行统计, 以计算群落中各物种的重要值:

$$\text{重要值} = (\text{相对盖度} + \text{相对高度} + \text{相对密度}) / 3 \quad (1)$$

1.4.2 α 多样性计算 本文选用 Margalef 丰富度指数、Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数、Pielou 均匀度指数 4 种常用的 α 多样性指数^[17], 公式如下:

$$\text{Margalef 丰富度指数}(R): R = (S - 1) / \ln N \quad (2)$$

$$\text{Shannon-Wiener 指数}(SW): SW = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (3)$$

$$\text{Pielou 均匀度指数}(E): E = SW / \ln S \quad (4)$$

$$\text{Simpson 指数}(SP): SP = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2 \quad (5)$$

式中: S 为样方中的物种数; P_i 为第 i 个物种占群落中总个体数的重要值; N 为所有物种的个体数之和。

1.4.3 数据分析 采用 SPSS 26.0 软件进行方差分析、相关性分析等, 采用 Origin 2021, R4.3.3 等进行数据分析及可视化。采用独立样本 T 检验法检验围封对不同群落数量特征及多样性的影响; 采用单因素方差分析(one-way ANOVA)以及最小显著性检验法(LSD)检验不同群落数量特征及多样性的显著性差

异;采用双因素方差分析(Duncan 法)方法研究群落类型和牲畜干扰对植物群落数量特征及多样性的影响;用 Pearson 相关系数评价植物群落结构功能特征与地上生物量间相关关系。差异水平定义为 $p < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 围封对植物群落物种组成和重要值的影响

本研究利用重要值这一指标研究围封对不同植物群落物种组成特征的影响。由表 2 可知,围封不会改变不同植物群落内建群种优势地位,但改变了其物种组成和重要值。除猪毛蒿群落外,其余 3 个植物群落的物种数均表现为放牧大于围封。在猪毛蒿群落内,围封草地共出现 17 种植物,较放牧草地增加了 13.33%;而其建群种重要值为 40.06%,较放牧草地降低了 30.09%。在短花针茅群落内,围封草地共出现 14 种植物,放牧草地共出现 20 种植物,其降幅为 30%;而其建群种重要值分别为 36.15%和 30.51%,增幅为 18.49%。在苦豆子群落内,围封草地共出现 15 种植物,放牧草地共出现 23 种植物,其降幅为 34.78%;而其建群种重要值分别为 17.64%和 18.29%,降幅为 3.55%。在油蒿群落内,围封草地共出现 12 种植物,放牧草地共出现 20 种植物,其降幅为 40%;而其建群种重要值分别为 33.81%和 31.32%,增幅为 7.95%。综上所述,草地围封对群落的物种组成产生了影响,可增加一年生植物(猪毛蒿)群落的物种数量,降低多年生植物(短花针茅、苦豆子、油蒿)群落的物种数。

2.2 围封对植物群落功能群物种组成及重要值的影响

如图 1A 所示,围封增加了猪毛蒿群落内一年生杂类草和半灌木植物的物种数,增幅分别为 33.33%和 100%,降低了多年生杂类草的物种数,降幅为 16.67%。在短花针茅群落中,围封增加了半灌木的物种数,增幅为 100%,降低了一年生杂类草、多年生禾草和多年生杂类草的物种数,降幅分别为 100%,75%和 25%。在苦豆子群落中,围封增加了一年生杂类草的物种数,增幅为 40%,降低了多年生禾草、多年生杂类草和半灌木的物种数,降幅分别为 80%,41.67%和 100%。在油蒿群落中,围封降低了一年生杂类草、多年生禾草、多年生杂类草和半灌木的物种数,降幅分别为 28.57%,50%,50%和 33.33%。

从图 1B 可以看出,在猪毛蒿群落内,围封增加了多年生禾草、多年生杂类草和半灌木植物的重要值,增幅分别为 47.73%,24.85%和 1600%,降低了一年生杂类草的重要值,降幅为 22.65%。在短花针茅群落中,围封增加了多年生杂类草和半灌木的重要值,增幅分别为 5.85%和 33.15%,降低了一年生杂类草和多年生禾草

的重要值,降幅分别为 100%和 10.14%。在苦豆子群落中,围封增加了一年生杂类草的重要值,增幅为 127.39%,降低了多年生禾草、多年生杂类草和半灌木的重要值,降幅分别为 88.32%,0.73%和 100%。在油蒿群落中,围封增加了一年生杂类草、多年生杂类草和半灌木的重要值,增幅分别为 182.55%,18.96%和 19.22%,降低了多年生禾草的重要值,降幅为 80.77%。

2.3 围封对植物群落数量特征的影响

群落类型、牲畜干扰及其交互作用对群落数量特征的双因素方差分析表明(表 3)。群落类型对盖度、密度、高度以及地上生物量均有极显著影响($p < 0.01$);牲畜干扰对盖度、高度以及地上生物量有极显著影响($p < 0.01$),而对密度无显著影响($p > 0.05$);群落类型和牲畜干扰的交互作用对盖度、密度、高度以及地上生物量均有极显著影响($p < 0.01$)。

对不同植物群落的盖度、高度、密度及生物量等数量特征进行分析发现(图 2),除了苦豆子群落外,草地围封均显著增加了其余 3 种植物群落的盖度,且多年生草本植物群落的盖度显著低于一年生及多年生半灌木植物群落($p < 0.05$)。草地围封显著增加了一年生植物群落密度($p < 0.05$),其值约为自由放牧草地的两倍;但降低了多年生草本植物(苦豆子、短花针茅)群落的密度,尽管增加了多年生半灌木植物(油蒿)群落的密度,但影响不显著($p > 0.05$)。在草地围封情况下,猪毛蒿群落的密度显著高于另外 3 种群落($p < 0.05$);在自由放牧草地内,苦豆子群落的密度显著高于另外 3 个群落($p < 0.05$)。此外,与自由放牧草地相比,围封均显著增加了 4 种植物群落的高度($p < 0.05$),但在草地围封情况下不同植物群落间的高度差异不显著($p > 0.05$)。围封显著增加了 4 种植物群落地上生物量($p < 0.01$),其中在围封草地和自由放牧草地内,短花针茅群落的地上生物量均显著低于其余 3 种群落($p < 0.05$)。综上所述,荒漠草原不同植物群落的盖度、高度和地上生物量均对围封措施表现出了积极响应。

2.4 围封对植物群落物种多样性的影响

群落类型、牲畜干扰及其交互作用对植物群落物种多样性的双因素方差分析表明(表 4),群落类型对 Margalef 丰富度、Shannon-Wiener, Pielou 均匀度以及 Simpson 指数均有极显著影响($p < 0.01$);牲畜干扰对 Margalef 丰富度、Shannon-Wiener 以及 Pielou 均匀度指数均有极显著影响($p < 0.01$),而对 Simpson 指数影响不显著($p > 0.05$);群落类型和牲畜干扰的交互作用对 Margalef 丰富度指数有显著影响($p < 0.05$),对 Shannon-Wiener, Pielou 均匀度以及 Simpson 指数均有极显著影响($p < 0.01$)。

表 2 典型植物群落的物种组成及重要值
Table 2 Species composition and importance values of typical plant communities

植物名称	生活型	ASC		SBC		SAC		AOC	
		WF	FM	WF	FM	WF	FM	WF	FM
猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i>	AN	40.06	57.30	—	—	12.12	18.10	—	1.67
短花针茅 <i>Stipa breviflora</i>	PE	—	—	36.15	30.51	—	—	—	—
苦豆子 <i>Sophora alopecuroides</i>	PE	1.85	2.87	1.47	5.05	17.64	18.29	—	8.11
油蒿 <i>Artemisia ordosica</i>	SB	5.18	—	—	—	—	—	33.81	31.32
虎尾草 <i>Chloris virgata</i>	PE	8.31	6.90	—	3.59	—	6.40	—	18.91
画眉草 <i>Eragrostis pilosa</i>	AN	6.66	12.31	—	—	—	—	—	0.52
阿尔泰狗娃花 <i>Aster altaicus</i>	SB	4.07	3.15	5.24	2.47	2.23	6.47	3.55	0.94
猪毛菜 <i>Kali collinum</i>	AN	4.87	—	—	—	—	0.46	3.79	2.61
叉枝鸭葱 <i>Scorzonera divaricata</i>	PE	4.07	0.78	1.91	—	—	—	1.56	—
蒺藜 <i>Tribulus terrester</i>	AN	0.97	4.80	—	—	—	—	—	—
灰绿藜 <i>Oxybasis glauca</i>	AN	1.82	1.31	—	—	17.50	—	—	—
雾冰藜 <i>Grubovia dasyphylla</i>	AN	2.61	—	—	—	1.99	—	—	0.42
地锦草 <i>Euphorbia humifusa</i>	AN	3.38	0.82	—	—	4.24	4.49	0.62	6.98
柠条锦鸡儿 <i>Caragana korshinskii</i>	SB	5.69	—	—	—	—	—	—	—
地梢瓜 <i>Cynanchum thesioides</i>	PE	0.88	1.87	3.49	8.26	5.62	—	—	0.35
艾蒿 <i>Artemisia argyi</i>	PE	1.35	0.25	—	—	0.77	2.05	—	—
白草 <i>Pennisetum flaccidum</i>	PE	7.66	3.91	—	1.74	—	15.35	6.45	11.01
砂蓝刺头 <i>Echinops gmelini</i>	AN	0.57	—	—	1.50	—	—	7.23	0.31
冠芒草 <i>Enneapogon borealis</i>	AN	—	2.24	—	—	13.21	—	—	—
达乌里胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i>	SB	—	0.64	6.31	11.26	—	—	—	1.21
乳浆大戟 <i>Euphorbia esula</i>	PE	—	0.86	—	—	—	0.74	—	0.68
针枝芸香 <i>Haplophyllum tragacanthoides</i>	SB	—	—	6.05	3.28	—	—	—	—
披针叶黄华 <i>Thermopsis lanceolata</i>	PE	—	—	7.46	1.64	2.04	—	—	—
沙葱 <i>Allium mongolicum</i>	PE	—	—	16.39	5.86	—	—	—	—
银灰旋花 <i>Convolvulus ammannii</i>	PE	—	—	1.02	3.34	—	0.37	—	—
草木樨状黄芪 <i>Astragalus melilotoides</i>	PE	—	—	4.53	3.17	—	—	—	—
甘草 <i>Glycyrrhiza uralensis</i>	PE	—	—	2.99	2.30	—	—	—	—
老瓜头 <i>Cynanchum komarovii</i>	SB	—	—	4.53	—	—	4.32	—	1.22
猫头刺 <i>Oxytropis aciphylla</i>	SB	—	—	2.46	—	—	—	6.44	—
远志 <i>Polygala tenuifolia</i>	PE	—	—	—	4.48	—	1.38	—	1.59
刺藜 <i>Chenopodium aristatum</i>	AN	—	—	—	1.70	6.20	1.25	23.24	—
长芒草 <i>Stipa bungeana</i>	PE	—	—	—	4.39	—	2.34	—	—
蜆果芥 <i>Braya humilis</i>	PE	—	—	—	3.30	—	—	—	—
草地风毛菊 <i>Saussurea amara</i>	PE	—	—	—	0.24	—	0.77	—	—
地构叶 <i>Speranskia tuberculata</i>	PE	—	—	—	1.92	—	—	—	—
苦苣菜 <i>Ixeris polycephala</i>	AN	—	—	—	—	2.93	—	—	—
蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i>	PE	—	—	—	—	0.50	1.30	—	—
委陵菜 <i>Potentilla chinensis</i>	PE	—	—	—	—	9.32	2.43	—	—
沙芦草 <i>Agropyron mongolicum</i>	PE	—	—	—	—	3.70	—	—	—
赖草 <i>Leymus secalinus</i>	PE	—	—	—	—	—	6.11	1.38	9.65
丝叶山苦荚 <i>Ixeridium gracile</i>	PE	—	—	—	—	—	1.16	—	0.67
鹤虱 <i>Lappula myosotis</i>	AN	—	—	—	—	—	1.29	—	—
砂珍棘豆 <i>Oxytropis racemosa</i>	PE	—	—	—	—	—	0.60	9.57	—
糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>	PE	—	—	—	—	—	1.49	—	1.16
骆驼蓬 <i>Peganum harmala</i>	PE	—	—	—	—	—	2.84	—	—
虫实 <i>Corispermum mongolicum</i>	AN	—	—	—	—	—	—	2.35	0.68
物种数 Number of species		17.00	15.00	14.00	20.00	15.00	23.00	12.00	20.00

注:WF 代表围封草地;FM 代表放牧草地;—代表此物种在样地内未发现;AN 代表一年生草本;PE 代表多年生草本;SB 代表半灌木。下同。

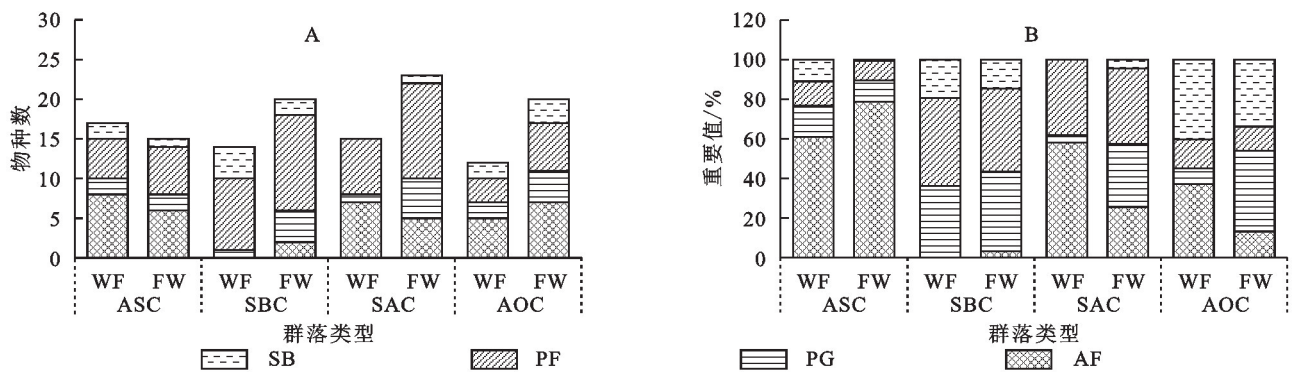


图 1 植物群落功能群的物种组成及重要值

Fig. 1 Species composition and importance values of plant community functional groups

表 3 群落类型、牲畜干扰及其交互作用对群落数量特征的双因素方差分析

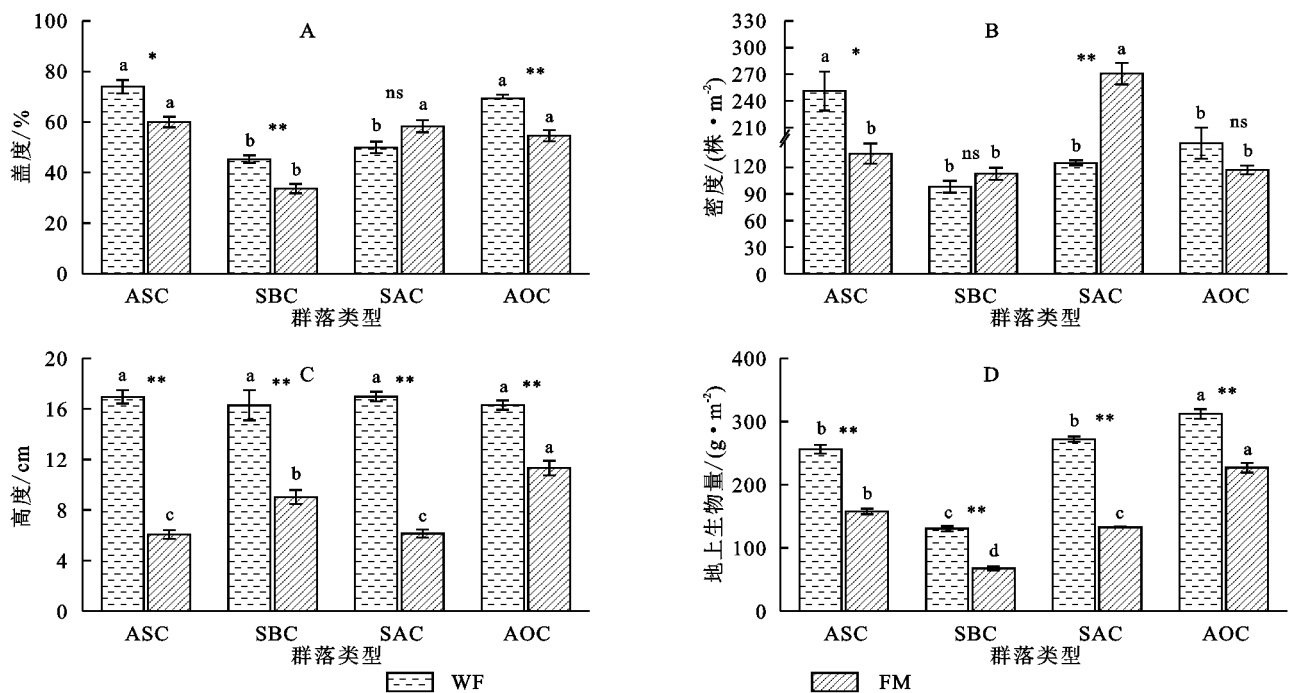
Table 3 Two-way ANOVA of community type, livestock disturbance and their interactions on community quantitative characteristics

数量指标	CT	LD	CT×LD
盖度/%	65.70 **	29.42 **	13.78 **
密度/(株·m ⁻²)	28.03 **	0.18	39.90 **
高度/cm	6.70 **	405.88 **	11.71 **
地上生物量/(g·m ⁻²)	330.49 **	616.01 **	17.10 **

注:表中数据为 F 值, * 代表 $p < 0.05$, ** 代表 $p < 0.01$; CT 代表群落类型; LD 代表牲畜干扰。下同。

对不同样地 4 种植物群落 α 多样性指数进行分析后发现(图 3),围封对 4 种植物群落 α 多样性指数均有不同程度的影响。围封降低了 4 种植物群落的 Margalef 丰富度指数,对多年生植物群落影响显著($p < 0.05$),而

对一年生植物群落的影响不显著($p > 0.05$);在围封和自由放牧草地内,多年生草本植物群落的 Margalef 丰富度指数显著高于一年生及多年生半灌木植物群落($p < 0.05$)。围封显著增加了一年生植物群落的 Shannon-Wiener 和 Simpson 指数($p < 0.01$),但显著降低了多年生草本植物群落($p < 0.05$),而对多年生半灌木群落的影响不显著($p > 0.05$);在自由放牧草地内,多年生草本植物群落的 Shannon-Wiener 和 Simpson 指数显著高于一年生及多年生半灌木植物群落($p < 0.05$)。围封显著增加了一年生植物群落的 Pielou 均匀度指数($p < 0.01$),而对多年生植物群落影响不显著($p > 0.05$);在围封和自由放牧草地内,一年生植物群落的 Pielou 均匀度指数显著小于多年生植物群落($p < 0.05$)。总体而言,在围封和自由放牧草地内,一年生植物群落各 α 多样性指数低于另外 3 种多年生植物群落。



注:图中数据表示平均值±标准误($n=3$),不同小写字母代表相同处理下,不同群落类型间差异显著性($p < 0.05$);* 与 ** 分别代表同一群落类型在不同处理间在 $p < 0.05$ 与 $p < 0.01$ 水平上差异显著,ns 代表同一群落类型不同处理间差异不显著。下同。

图 2 植物群落数量特征对围封的响应

Fig. 2 Response of plant community quantitative characteristics to enclosure

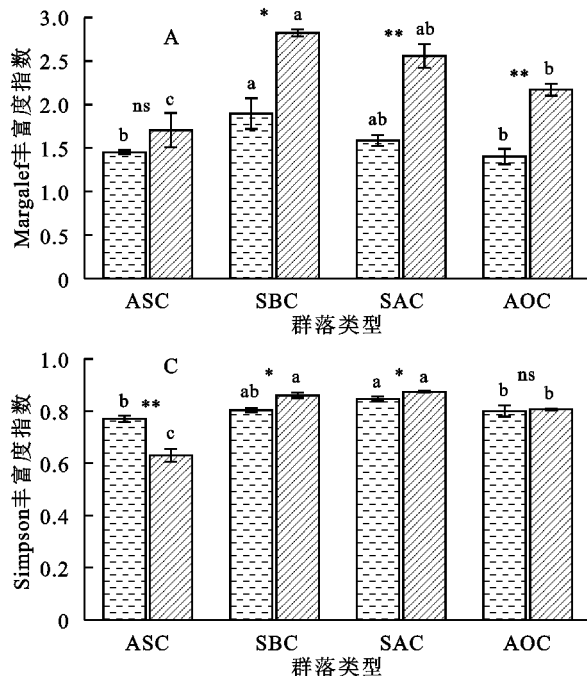
表 4 群落类型、牲畜干扰及其交互作用对

群落 α 多样性指数的双因素方差分析Table 4 Two-way ANOVA of community type, livestock disturbance and their interactions on community α diversity index

α 多样性指数	CT	LD	CT \times LD
Margalef 丰富度指数	17.37 **	80.06 **	4.09 *
Shannon-Wiener 指数	52.87 **	18.37 **	20.40 **
Pielou 均匀度指数	25.36 **	22.07 **	6.25 **
Simpson 指数	52.72 **	1.69	20.70 **

2.5 植物群落数量特征和物种多样性的关系

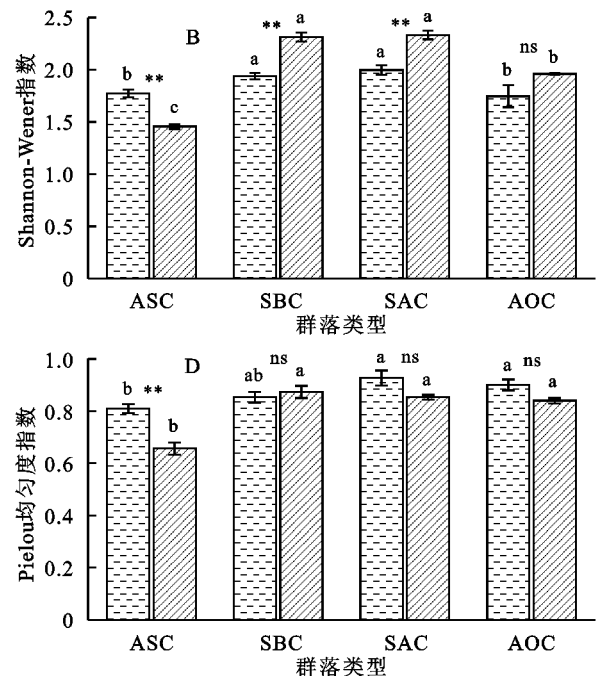
对不同植物群落数量特征与 α 多样性进行 Mantel-Test 分析发现(图 4),地上生物量与盖度、Margalef 丰富度指数的相关性较强($r \geq 0.4$),与高度和 Shannon-

图 3 不同植物群落 α 多样性指数对围封的响应Fig. 3 Response of α diversity index of different plant communities to enclosure

结合图 4,进一步对地上生物量与群落数量特征、 α 多样性间具有极显著关系的因子作线性回归分析发现(图 5)。地上生物量与盖度、高度存在极显著的正相关关系($p < 0.001$, $R^2 = 0.44$; $p < 0.001$, $R^2 = 0.378$),其关系回归方程分别为 $y = 4.33x - 46.73$ 和 $y = 11.00x + 58.23$,即地上生物量随着盖度、高度的增加逐渐增加;地上生物量与 Shannon-Wiener 指数存在显著负相关关系($p < 0.05$, $R^2 = 0.18$),其关系回归方程为 $y = -130.78x + 448.07$,说明 Shannon-Wiener 指数越高,地上生物量越低;地上生物量与 Margalef 丰富度指数存在极显著负相关关系($p < 0.001$, $R^2 = 0.57$),其关系回归方程为 $y = -118.43x + 425.28$,说明 Margalef 丰富度指数越高,地上生物量越低。

Wiener 多样性指数的相关性中等($0.2 \leq r < 0.4$),且均存在极显著性($p < 0.01$)。地上生物量与密度、Pielou 均匀度指数以及 Simpson 指数的相关性较低($r < 0.2$),且显著水平较低($p > 0.05$)。

从图 5 可以看出,盖度与密度具有极显著正相关关系($p < 0.01$),与 Shannon-Wiener, Margalef 丰富度指数具有极显著负相关关系($p < 0.01$)。高度与 Pielou 均匀度指数具有极显著正相关关系($p < 0.01$),与 Margalef 丰富度指数具有极显著负相关关系($p < 0.01$)。Shannon-Wiener 指数与 Pielou 均匀度、Simpson 以及 Margalef 丰富度指数具有极显著正相关关系($p < 0.01$)。Pielou 均匀度指数与 Simpson 指数具有极显著正相关关系($p < 0.01$)。Simpson 指数与 Margalef 丰富度指数存在显著正相关关系($p < 0.05$)。



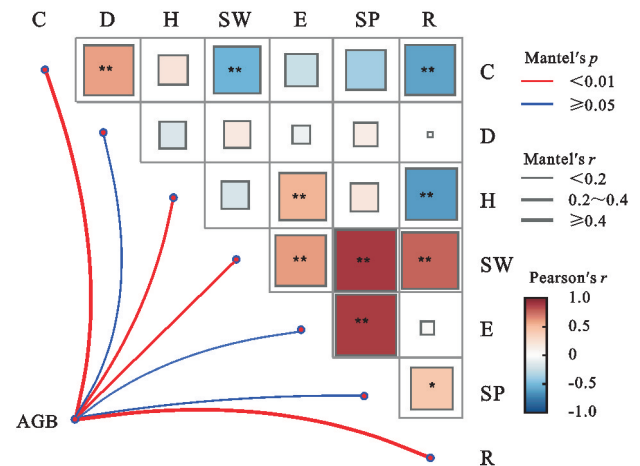
3 讨论

重要值可反映不同植物在群落中的地位和作用,也可了解物种间相互关系,其大小是确定群落优势种和建群种的重要依据^[18]。本研究发现,围封对荒漠草原不同植物群落物种组成的影响存在差异,但不会改变建群种在群落中的优势地位,这也说明了猪毛蒿、短花针茅、苦豆子、油蒿 4 种植物能很好地适应宁夏荒漠草原环境,在群落中竞争力较强^[19]。不同群落对草地围封的敏感性不同,围封措施增加了猪毛蒿和苦豆子群落中建群种重要值,降低短花针茅和油蒿群落中建群种重要值。可能是在自由放牧草地,由于家畜选择性采食和践踏,使得适口性植物生长受到抑

制,群落物种组成发生变化,群落高度、盖度、生物量等数量特征显著降低,群落结构发生明显改变^[20]。去除牲畜干扰后草地生态系统自我更新能力增强,群落中植物种群得到快速繁殖、生长与发育,植被逐渐恢复^[21]。本研究发现,荒漠草原不同生活型植物群落的盖度、高度和地上生物量对围封均具有积极响应,这与赵盼盼等^[22]对荒漠草原的研究结果一致。这主要是由于草地围封后植被快速恢复,使得植物固定的碳、氮、磷、钾等营养元素被固定在植物中,而减少了养分和能量向食草动物的外流,这些营养物质最终以枯落物的形式进入土壤并逐渐分解,促进了土壤性状恢复,提高草地土壤肥力和保水能力^[23]。土壤性状的改善又反过来影响植物的更新与生长,加速植被恢复过程,促进了退化草地恢复^[1]。

植物群落多样性是评价群落内物种分布数量和均匀程度的重要测量指标^[24]。本研究发现,围封对宁夏荒漠草原不同植物群落各 α 多样性指数的影响程度不同,围封显著降低了多年生草本植物群落的 Margalef 丰富度、Shannon-Wiener 和 Simpson 多样性指数,显著增加了一年生植物群落的 Simpson, Shannon-Wiener, Pielou 指数,而对多年生半灌木植物群落的 Simpson, Shannon-Wiener, Pielou 指数影响不显著,与王晓芳等^[25]的研究结果部分一致,主要取决于群落内种间竞争关系和植物对环境变化的响应差异性,由于不同植物种生物学特性及其对环境需

求的差异,草地围封种群生态位配置及可利用环境资源发生变化,植物种间关系改变,从而间接影响群落物种组成特征,种间竞争的改变削弱了群落内优势物种排除其他物种的能力,进而改变物种多样性^[26]。在本研究中围封降低了多年生群落中多年生禾草的优势地位,而家畜不喜采食的非优势杂类草在群落中地位增加,群落结构复杂性增加,从而导致植物群落多样性增加,与江小蕾等^[27]的研究结果相似。



注: *, ** 分别代表 p 在 0.05, 0.01 水平上显著; 红色代表 $p < 0.01$, 代表显著, 蓝色代表 $p \geq 0.05$, 代表不显著; r 代表相关性大小; C 代表盖度; D 代表密度; H 代表高度。

图4 地上生物量与群落数量特征、 α 多样性指数的 Mantel-Test 分析

Fig. 4 Mantel-Test analysis of aboveground biomass and community quantitative characteristics and α diversity index

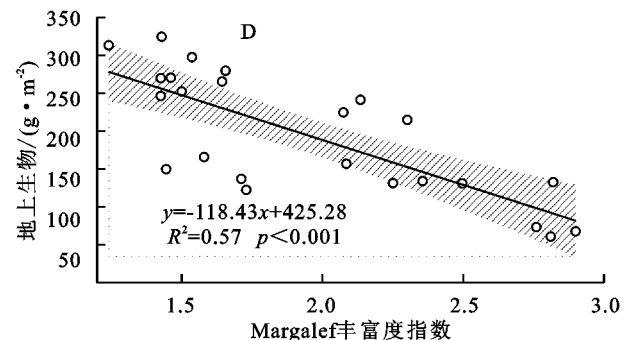
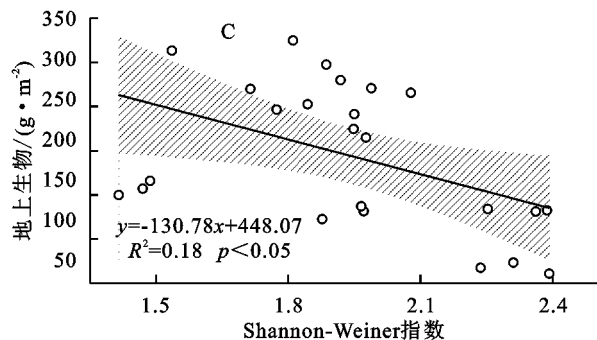
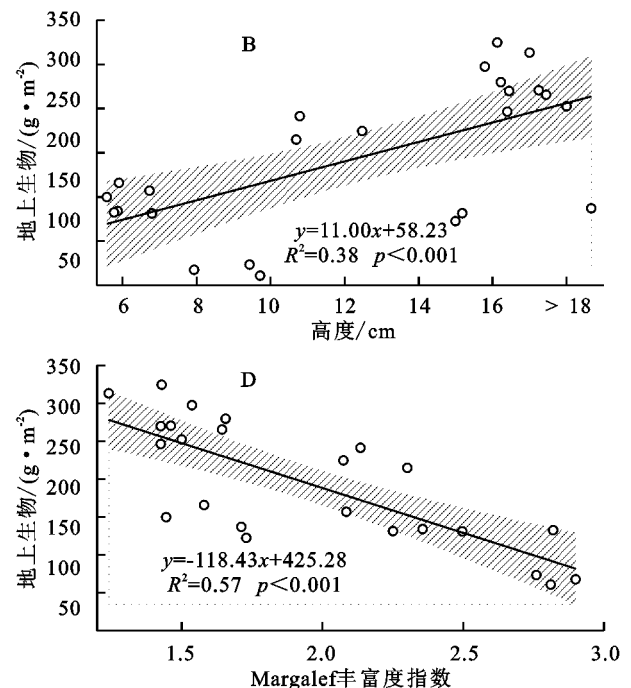
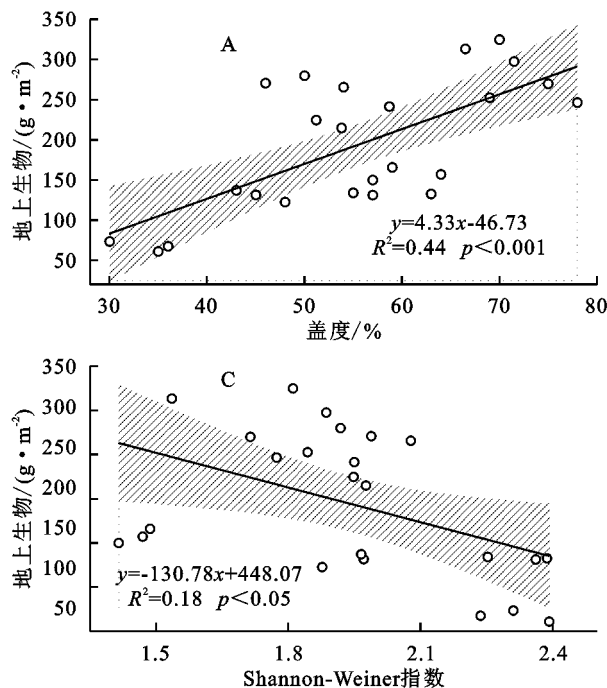


图5 地上生物量与群落数量特征、 α 多样性指数的拟合关系

Fig. 5 Fitting relationship between aboveground biomass and community quantitative characteristics and α diversity index

研究草地生产力和植物群落多样性的关系,对于正

确理解草地生态系统结构和功能具有重要意义^[28]。有

研究表明,物质能量、环境资源等条件的时空异质性差异可改变植物群落多样性和生产力间作用关系^[29]。植物多样性指数类型不同,其与生产力间关系也存在差异,本研究结果发现群落地上生物量与 Simpson 指数、Pielou 指数均无显著相关关系;而与 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 指数均呈负相关关系,与 Bai 等^[30]的研究结果基本一致。这说明群落地上生产力与不同群落内部调节作用密切相关,不同群落中植物种对环境资源需求的差异调节植物种组成,进而影响地上生产力^[31]。

4 结 论

(1) 围封不会改变宁夏荒漠草原 4 种典型植物群落中建群种的竞争优势地位,但可改变群落物种组成及其重要值特征,降低多年生植物(短花针茅、苦豆子和油蒿)群落的物种总数,增加一年生植物(猪毛蒿)群落的物种总数;降低了不同群落中多年生杂类草物种数量,并增加了多年生植物群落中多年生杂草和多年生禾草植物的重要值。

(2) 群落类型、牲畜干扰方式及其交互作用显著影响植物群落数量特征,与自由放牧草地相比,围封可显著增加 4 种典型植物群落的高度和地上生物量($p < 0.01$),显著增加一年生植物群落的密度和盖度($p < 0.05$);在草地围封情况下,不同群落的高度无显著差异($p > 0.05$),而一年生植物群落的密度显著高于其余 3 种多年生植物群落($p < 0.05$)。

(3) 群落类型、牲畜干扰方式及其交互作用显著影响植物群落各 α 多样性特征,与自由放牧草地相比,围封降低了 4 种典型植物群落的 Margalef 丰富度指数,显著降低了多年生草本植物(短花针茅、苦豆子)群落的 Shannon-Wiener 和 Simpson 指数,并显著增加了一年生植物群落的 Shannon-Wiener、Simpson 和 Pielou 指数($p < 0.05$),但对半灌木(油蒿)植物群落的多样性特征影响不显著($p > 0.05$)。在自由放牧及围封草地内,不同生活型群落间的各 α 多样性整体表现为多年生草本植物 > 半灌木植物 > 一年生草本植物群落。

(4) 不同群落的地上生物量与密度、Simpson、Pielou 指数均无显著相关关系($p > 0.05$),而与盖度、高度呈极显著正相关关系($p < 0.001$),与 Margalef 丰富度指数呈极显著负相关关系($p < 0.001$)、与 Shannon-Wiener 指数呈显著负相关关系($p < 0.05$)。

参考文献(References):

[1] 李佳秀,张青松,吴勇,等.围封对草地植被生长和土壤特性的影响研究进展[J].中国草地学报,2023,45(5):

137-150.

Li J X, Zhang Q S, Wu Y, et al. Research progress on the effects of enclosure on grassland vegetation growth and soil properties[J]. Chinese Journal of Grassland, 2023,45(5):137-150.

[2] 周华坤,周立,刘伟,等.封育措施对退化与未退化矮蒿草草甸的影响[J].中国草地,2003,25(5):15-22.

Zhou H K, Zhou L, Liu W, et al. The influence of fencing on degraded *Kobresia humilis* meadows and nondegraded [J]. Grassland of China, 2003,25(5):15-22.

[3] 王明明,刘新平,何玉惠,等.科尔沁沙地封育恢复过程中植物群落特征变化及影响因素[J].植物生态学报,2019,43(8):672-684.

Wang M M, Liu X P, He Y H, et al. How enclosure influences restored plant community changes of different initial types in Horqin Sandy Land[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2019,43(8):672-684.

[4] Mengistu T, Teketay D, Hulten H, et al. The role of enclosures in the recovery of woody vegetation in degraded dryland hillsides of central and northern Ethiopia[J]. Journal of Arid Environments, 2005,60(2):259-281.

[5] Renne I J, Tracy B F. Disturbance persistence in managed grasslands: Shifts in aboveground community structure and the weed seed bank[J]. Plant Ecology, 2007,190(1):71-80.

[6] 阿斯太肯·居力海提,董乙强,周时杰,等.封育对不同草地类型植物群落多样性及生态位特征的影响:以新疆不同类型草地为例[J].草业科学,2023,40(5):1168-1185.

Julihaiti · A, Dong Y Q, Zhou S J, et al. Effects of enclosure on vegetation diversity and niche characteristics of different grassland types in Xinjiang[J]. Pratacultural Science, 2023,40(5):1168-1185.

[7] 王健,张瑞强,阿比亚斯,等.围封对内蒙古希拉穆仁草地物种多样性的影响[J].水土保持通报,2019,39(2):62-67,75.

Wang J, Zhang R Q, Abi Y, et al. Effects of enclosure on species diversity in Xilamuren grassland, Inner Mongolia[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(2):62-67,75.

[8] 孙崇之,唐士明,王珍,等.温带草原围封对植物群落的影响[J].草地学报,2023,31(5):1481-1489.

Sun C Z, Tang S M, Wang Z, et al. Effects of the enclosure on plant communities in temperate grassland[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023,31(5):1481-1489.

[9] 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.

Zhao S L, Zuo X A, Zhang T H, et al. Response of relationship between community species diversity and aboveground biomass to grazing intensity in the urat desert steppe in North China[J]. Arid Zone Research, 2020,37(1):168-177.

- [10] 吴宛萍,马红彬,陆琪,等.补播对宁夏荒漠草原植物群落及土壤理化性状的影响[J].草业科学,2020,37(10):1959-1969.
Wu W P, Ma H B, Lu Q, et al. Effects of supplementary sowing on plant community and soil physical and chemical properties in Ningxia Desert steppe[J]. Pratacultural Science, 2020,37(10):1959-1969.
- [11] 胡海英,李惠霞,倪彪,等.宁夏荒漠草原典型群落的植被特征及其优势植物的水分利用效率[J].浙江大学学报:农业与生命科学版,2019,45(4):460-471.
Hu H Y, Li H X, Ni B, et al. Characteristic of typical vegetation community and water use efficiency of dominant plants in desert steppe of Ningxia[J]. Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Sciences, 2019,45(4):460-471.
- [12] 唐庄生.半干旱荒漠草原沙化过程中植被退化机制研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2018.
Tang Z S. Vegetation degradationon mechanism of the desert steppe in semi-arid region [D]. Yangling, Shaanxi:Northwest A&F University, 2018.
- [13] Wang Z, Deng X Z, Song W, et al. What is the main cause of grassland degradation? A case study of grassland ecosystem service in the middle-south Inner Mongolia[J]. Catena, 2017,150:100-107.
- [14] Petchey O L, Casey T, Jiang L, et al. Species richness, environmental fluctuations, and temporal change in total community biomass[J]. Oikos, 2002,99(2):231-240.
- [15] 李洋,严振英,郭丁,等.围封对青海湖流域高寒草甸植被特征和土壤理化性质的影响[J].草业学报,2015,24(10):33-39.
Li Y, Yan Z Y, Guo D, et al. Effects of fencing and grazing on vegetation and soil physical and chemical properties in an alpine meadow in the Qinghai Lake Basin [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015,24(10):33-39.
- [16] 马建军,姚虹,冯朝阳,等.内蒙古典型草原区 3 种不同草地利用模式下植物功能群及其多样性的变化[J].植物生态学报,2012,36(1):1-9.
Ma J J, Yao H, Feng Z Y, et al. Changes in plant functional groups and species diversity under three grassland using modes in typical grassland area of Inner Mongolia, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2012,36(1):1-9.
- [17] 陈萍.黄河三角洲不同潜水埋深下柽柳灌丛土壤养分和盐分的富集效应[D].山东泰安:山东农业大学,2023.
Chen P. Enrichment Effect of Soil Nutrients and Salinity in *Tamarix ramosissima* Shrub under Different Groundwater Depth in the Yellow River Delta[D]. Taian, Shandong: Shandong Agricultural University, 2023.
- [18] Xu Y J, Chen Y N, Li W H, et al. Distribution pattern of plant species diversity in the mountainous region of Ili River Valley, Xinjiang[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011,177(1/2/3/4):681-694.
- [19] 陶利波,于双,王国会,等.封育对宁夏东部风沙区荒漠草原植物群落特征及其稳定性的影响[J].中国草地学报,2018,40(2):67-74.
Tao L B, Yu S, Wang G H, et al. Effects of enclosure on characteristics and stability of vegetation community of desert steppe in sandy area of eastern Ningxia[J]. Chinese Journal of Grassland, 2018,40(2):67-74.
- [20] 苏淑兰,李洋,王立亚,等.围封与放牧对青藏高原草地生物量与功能群结构的影响[J].西北植物学报,2014,34(8):1652-1657.
Su S L, Li Y, Wang L Y, et al. Effect of fencing on plant biomass and functional group structure of different types of degraded grassland in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2014, 34(8):1652-1657.
- [21] 闫玉春,唐海萍,辛晓平,等.围封对草地的影响研究进展[J].生态学报,2009,29(9):5039-5046.
Yan Y C, Tang H P, Xin X P, et al. Advances in research on the effects of exclosure on grasslands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009,29(9):5039-5046.
- [22] 赵盼盼,李国旗,邵文山,等.围封对荒漠草原区沙芦草群落土壤种子库及地上植被的影响[J].草业学报,2018,27(1):42-52.
Zhao P P, Li G Q, Shao W S, et al. Influence of herbivore exclusion on the soil seed bank and the aboveground vegetation characteristics of *Agropyron mongolicum* dominant desert steppe grassland [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018,27(1):42-52.
- [23] 李强,宋彦涛,周道玮,等.围封和放牧对退化盐碱草地土壤碳、氮、磷储量的影响[J].草业科学,2014,31(10):1811-1819.
Li Q, Song Y T, Zhou D W, et al. Effects of fencing and grazing on soil carbon, nitrogen, phosphorus storage in degraded alkali-saline grassland[J]. Pratacultural Science, 2014,31(10):1811-1819.
- [24] 李文娇,刘红梅,赵建宁,等.氮素和水分添加对贝加尔针茅草原植物多样性及生物量的影响[J].生态学报,2015,35(19):6460-6469.
Li W J, Liu H M, Zhao J N, et al. Effects of nitrogen and water addition on plant species diversity and biomass of common species in the *Stipa baicalensis* steppe, Inner Mongolia, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(19):6460-6469.
- [25] 王晓芳,马红彬,沈艳,等.不同轮牧方式对荒漠草原植物群落特征的影响[J].草业学报,2019,28(4):23-33.
Wang X F, Ma H B, Shen Y, et al. Effects of different rotational grazing patterns on plant community characteristics in desert steppe grassland[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019,28(4):23-33.

- [17] 白岗栓, 罗东, 苗庆丰, 等. PAM 喷施量与施用方式对风沙土风蚀的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 90-98.
Bai G S, Luo D, Miao Q F, et al. Effects of spraying amounts and application methods of polyacrylamide (PAM) on aeolian sandy soil wind erosion[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(10): 90-98.
- [18] 夏海江, 杜尧东, 孟维忠. 聚丙烯酰胺防治坡地土壤侵蚀的室内模拟试验[J]. 水土保持学报, 2000, 14(3): 14-17, 83.
Xia H J, Du Y D, Meng W Z. Simulated experiment of preventing soil erosion with polyacrylamide on sloping field[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2000, 14(3): 14-17, 83.
- [19] 万佳蕾. 施用聚丙烯酰胺对不同土壤特性及其产流产沙效果研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2017.
Wan J L. Study on the Effects of Polyacrylamide on the Characteristics, Yield and Sediment of on Different Types of Red Soil[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2017.
- [20] 兰本. PAM 与玉米秸秆组合施用对坡耕地产流产沙的影响研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2017.
Lan B. Effects of corn straw mulching and polyacrylamide applying in surface soil on water and soil loss in sloping fields[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2017.
- [21] 付晨星. PAM 和 SAP 交并施用对旱区坡耕地土壤水力特性和水肥流失的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
Fu C X. Research on combined application of pam and sap on hydraulic characteristics and water and fertilizer loss for sloping farmland in arid area[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018.
- [22] 张贺. PAM 和粉煤灰组合施用对坡面水土流失的影响[D]. 太谷: 山西农业大学, 2019.
Zhang H. Effect of PAM and fly Ash on runoff and sediment yield on Slope Land under artificial rainfall[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2019.
- [23] 李起龙. 不同下垫面条件堤防坡面侵蚀特征试验研究[D]. 长春: 长春工程学院, 2021.
Li Q L. Experimental study on erosion characteristics of embankment slope under different underlying surface conditions[D]. Changchun: Changchun Institute of Technology, 2021.
- [24] 宋月君, 黄炎和, 杨洁, 等. 南方典型土壤坡面产流产沙过程对 PAM 的响应[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 279-287.
Song Y J, Huang Y H, Yang J, et al. Response of runoff and sediment to PAM in typical soil slopes of South China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 279-287.
- [25] 谢小芳. 坡地红壤茶园施用聚丙烯酰胺(PAM)的适用性研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2013.
Xie X F. Applicability study on polyacrylamide(PAM) Application in slope red soil of tea garden[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013.

~~~~~  
(上接第 130 页)

- [26] Yu L, Zhao J N, Wang H, et al. Effects of nutrient addition on plant diversity and productivity in a *Stipa baicalensis* grassland in Inner Mongolia, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(24): 8165-8173.
- [27] 江小蕾, 张卫国, 杨振宇, 等. 不同干扰类型对高寒草甸群落结构和植物多样性的影响[J]. 西北植物学报, 2003, 23(9): 1479-1485.  
Jiang X L, Zhang W G, Yang Z Y, et al. The influence of disturbance on community structure and plant diversity of alpine meadow[J]. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 2003, 23(9): 1479-1485.
- [28] 张义, 程杰, 苏纪帅, 等. 长期封育演替下典型草原植物群落生产力与多样性关系[J]. 植物生态学报, 2022, 46(2): 176-187.  
Zhang Y, Cheng J, Su J S, et al. Diversity-productivity relationship of plant communities in typical grassland during the long-term grazing exclusion succession[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2022, 46(2): 176-187.
- [29] 马文红, 方精云. 中国北方典型草地物种丰富度与生产力的关系[J]. 生物多样性, 2006, 14(1): 21-28.  
Ma W H, Fang J Y. The relationship between species richness and productivity in four typical grasslands of Northern China[J]. Biodiversity Science, 2006, 14(1): 21-28.
- [30] Bai Y F, Wu J G, Pan Q M, et al. Positive linear relationship between productivity and diversity: Evidence from the Eurasian Steppe[J]. Journal of Applied Ecology, 2007, 44(5): 1023-1034.
- [31] 胡凤烨, 赵锐锋, 张丽华, 等. 黄河首曲湿地植物群落生产力、物种多样性及其与生境的关系[J]. 生态学报, 2023, 43(24): 10238-10249.  
Hu F Y, Zhao R F, Zhang L H, et al. Productivity and species diversity of plant communities and their relationship with habitats in the wetland of first meander of Yellow River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(24): 10238-10249.