

季节性放牧对补播改良荒漠草原植物群落地上生物量及物种多样性的影响

张飞¹, 马玉荣¹, 梁瑞泽¹, 李豫悦¹, 田海洋¹, 杨鑫^{1,2*}

(1. 宁夏大学农学院, 宁夏银川 750021; 2. 宁夏草牧业工程技术研究中心, 宁夏银川 750021)

摘要 放牧是影响天然草原植物生产力、群落组成与多样性的主要生物因子之一。以补播改良荒漠草原为研究对象, 通过比较禁牧、夏季放牧和夏秋放牧处理对植物地上生物量、群落组成和多样性的变化, 分析补播草地区域与原生植被区域对季节性放牧的响应。结果表明, 夏秋放牧处理降低草原植物群落地上生物量与物种丰富度。补播草地区域, 夏秋放牧显著降低优势植物蒙古冰草 (*Agropyron mongolicum*)、达乌里胡枝子 (*Lespedeza davurica*) 和沙打旺 (*Astragalus adsurgens*) 地上生物量; 夏季放牧对蒙古冰草 (*A. mongolicum*) 地上生物量无影响。原生植被区域, 夏秋放牧降低蒙古冰草 (*A. mongolicum*) 地上生物量, 2 种处理对牛枝子 (*Lespedeza potaninii*) 地上生物量无显著影响。补播草地区域, 家畜喜食蒙古冰草 (*A. mongolicum*)、达乌里胡枝子 (*L. davurica*) 和沙打旺 (*A. adsurgens*)。原生植被区域, 放牧前期家畜喜食牛枝子 (*L. potaninii*), 放牧后期蒙古冰草 (*A. mongolicum*)、牛枝子 (*L. potaninii*) 均被喜食。夏季放牧与夏秋放牧均降低补播草地达乌里胡枝子 (*Lespedeza davurica*) 和沙打旺 (*A. adsurgens*) 地上生物量, 不利于补播草地“上繁草”型豆科植物生长与维持。

关键词 豆科植物; 补播; 荒漠草原; 植被特征; 择食指数

中图分类号 S812 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2023)08-0053-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.08.013



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Effect of Seasonal Grazing on Plant Community Aboveground Biomass and Diversity in Reseeding Desert Steppe

ZHANG Fei, MA Yu-rong, LIANG Rui-ze et al (School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021)

Abstract Grazing is one of the main biotic factors changing plant productivity, composition and diversity in natural grassland. This study taking the improvement of desert grasslands through supplementary seedingsowing as the research object, analyzed the aboveground biomass and diversity of plant community in response to no grazing, summer grazing, summer-autumn grazing, and compared the response of reseeded grassland zone and natural grassland zone to seasonal grazing. The results showed that summer-autumn grazing decreased the aboveground biomass and species richness of grassland plant community. In reseeded grassland zone, summer-autumn grazing significantly reduced the aboveground biomass of *Agropyron mongolicum*, *Lespedeza davurica* and *Astragalus adsurgens*; Summer grazing had no effect on the aboveground biomass of *A. mongolicum*. In natural grassland zone, summer-autumn grazing decreased the aboveground biomass of *A. mongolicum*, while the two treatments had no significant impact on the aboveground biomass of *Lespedeza potaninii*. In the reseeded grassland zone, livestock prefer to eat *A. mongolicum*, *L. davurica*, and *A. adsurgens*. In natural grassland zone, livestock prefer to eat *L. potaninii* during the early grazing period, while *A. mongolicum* and *L. potaninii* are both favored during the later grazing period. Both summer and summer-autumn grazing reduced the aboveground biomass of *Lespedeza davurica* and *A. adsurgens*, which was not conducive to the growth and maintenance of leguminous plants of the “aboveground breeding grass” type in the reseeded grassland.

Key words Legume; Reseeding; Desert grassland; Vegetation characteristics; Food selection index

退化草原修复与合理利用已成为当前草地生态学领域的重要科学问题之一。已有大量研究开展退化草原的补播改良工作, 通过在草原补播适生强的优良草种可有效提升草原盖度、生产力与多样性, 进而加快草原恢复进度。在不同草地类型免耕补播豆科、禾本科等优良牧草后, 草地生产力与牧草营养品质均显著增加, 草地植物群落组成更加优化^[1]。补播改良措施均能有效提高草原植物群落盖度和显著提高生长季地上生物量^[2-3]。此外, 在荒漠草原翻耕补播蒙古冰草 (*Agropyron mongolicum*)、牛枝子 (*Lespedeza potaninii*)、草木樨状黄芪 (*Astragalus melilotoides*) 和沙打旺 (*A. adsurgens*) 等乡土草种后, 可有效增加草地盖度、高度和生产力, 提高土壤持水量^[3]和土壤碳、氮固持能力^[4]。

天然草原合理利用是有效缓解草畜矛盾, 维持草原生态系统结构与功能的重要途径^[5]。因天然草原季节性产草量

的差异, 放牧家畜的营养摄取极不均衡, 存在“夏肥秋壮, 冬瘦春死”的周期性特点^[6]。已有大量研究报道了放牧强度对天然草原植物、土壤和家畜的作用过程, 发现随着放牧强度的增加, 草地生产力、植物群落高度、盖度和密度显著降低, 草地植物群落物种多样性剧烈下降^[7]; 家畜喜食植物的重要值降低甚至消失, 而不喜食植物重要值显著增加。以往研究多集中在家畜持续放牧对草原植被、土壤和家畜生产性能的影响, 在放牧时间对天然草原植物群落特征的作用方面研究依然较少。

季节性放牧相较于持续放牧, 可根据天然草原生产力的季节性动态特征, 使家畜能科学合理地利用草原植物资源。可用于指导牧场的可持续发展, 以提供经济和环境效益, 例如降低动物饲养成本, 减轻自然牧场的放牧压力, 以及利用当地适应的植物材料恢复退化牧场^[5]。研究发现, 季节性放牧能提高草地植物群落高度、盖度、地上生物量和物种丰富度。与传统持续放牧相比, 季节性四区轮牧能提高荒漠草原土壤种子库中多年生植物种类、密度以及使种子库物种丰富度、多样性和均匀度增加^[8]。在生长旺季, 初春放牧草地群落及其高大优势植物大针茅和羊草的生物量显著增加, 而其

基金项目 宁夏农业科技自主创新资金农业高质量发展和生态保护科技创新示范项目(NGSB-2021-14-06); 宁夏高等学校一流学科建设(草学学科)项目(NXYLXK2017A01)。

作者简介 张飞(1995—), 男, 宁夏隆德人, 硕士研究生, 研究方向: 草地管理与生态。* 通信作者, 讲师, 博士, 硕士生导师, 从事草地管理与生态研究。

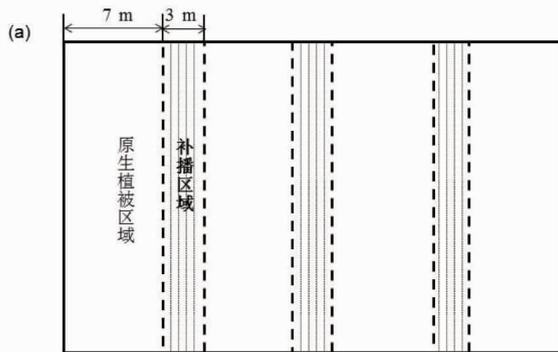
收稿日期 2022-04-21

下层的糙隐子草和杂类草生物量显著减少^[9]。牧草生长速率和可提供牧草的营养成分在休牧处理间差异不显著,但早期和中期休牧的牧草现存量显著高于持续放牧,年份和放牧时期的交互作用对牧草生长速率和营养成分有极显著的影响,且牧草生长速率在放牧期间的变化是造成牧草营养成分变化的主要原因。总体而言,早期和中期休牧有利于提高牧草现存量,但牧草的生长速率和营养品质不受休牧时期的影响^[10]。上述研究结果表明,季节性放牧有利于减小天然草原放牧压力,推进草地畜牧业的可持续发展^[11]。然而,在补播改良草地,季节性放牧如何影响草地植被特征,有待进一步研究。

该研究以宁夏补播改良荒漠草原为研究对象,比较禁牧、夏季放牧和夏秋放牧处理对补播改良荒漠草原补播草地区域与原生植被区域植物群落地上生物量、多样性及优势种生物量的影响,以期探讨不同植物种类对季节性放牧的响应过程,为补播改良草原合理利用提供科学依据。

1 试验区与试验方法

1.1 试验区概况 试验地位于宁夏回族自治区盐池县大水坑镇北部(37°46'N,106°96'E),海拔1 509.43 m。该区域属于温带大陆性季风气候,年均温为7.8℃,年降雨量为250~350 mm,降雨集中在生长季4—9月。试验样地植被类型属



于温性荒漠草原,常见优势植物为蒙古冰草(*Agropyron mongolicum*)和牛枝子(*Lespedeza potaninii*),2种植物地上生物量约占植物生产力的80%。伴生种为短花针茅(*Stipa breviflora*)、刺藜(*Chenopodium aristatum*)、猪毛蒿(*Artemisia Scoparia*)和阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)等。该区域于2017年春季进行补播改良,补播区域带宽3 m,隔带宽7 m(图1)。补播前对补播区域进行翻耕,翻耕深度30 cm。在补播区域,以蒙古冰草(*A. mongolicum*)、沙生冰草(*Agropyron desertorum*)、沙打旺(*A. adsurgens*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、羊柴(*Hedysarum laeve*)、草木樨状黄芪(*Astragalus melilotoides*)混合进行条播,播种量18 kg/hm²,行距30 cm。播种比例为:蒙古冰草:沙生冰草:沙打旺:达乌里胡枝子:羊柴:草木樨状黄芪=3.0:2.0:1.5:1.5:1:1。补播第3年(2019年)和第4年(2020年),补播区域地上净初级生产力分别为162和105 g/m²;原生植被区域地上净初级生产力分别为92和89 g/m²。补播第5年(2021年),补播区域形成以蒙古冰草(*A. mongolicum*)、达乌里胡枝子(*L. davurica*)与沙打旺(*A. adsurgens*)为优势的植物群落,地上生物量占群落地上生物量比例分别为59.09%、19.36%与18.81%;原生植被区域蒙古冰草(*A. mongolicum*)与牛枝子(*L. potaninii*)地上生物量占群落地上生物量比例分别为70.30%与9.90%。



图1 试验样地概况

Fig.1 Overview of test sample plot

1.2 试验设计 研究采用单因素完全随机试验设计,试验因素为季节性放牧(G),共有3个处理,即禁牧处理(G0),夏季放牧处理(G1,2021年7月20日—8月30日),夏秋放牧处理(G2,2021年7月20日—9月30日)。设置3个重复,共3×4=12个小区;每个小区面积为0.45 hm²(60 m×75 m)。

根据前期(2019和2020年)地上净初级生产力(90~100 g/m²),结合天然草原最优载畜率,确定适宜放牧强度为4只羊/hm²^[12]。试验动物选取24只遗传背景一致、体重(22.79±0.65)kg的5月龄滩羊公羔。放牧试验开始前,给滩羊打耳标,体内体外驱虫后,放置到各放牧小区。在每个放牧小区补播区域与原生植被区域放置各放置1个1 m×1 m移动围笼,用于测定植被利用率与择食指数^[13]。放牧处理开始后,夜间不归牧。每个放牧小区放置一个定期移动的水源和盐分舔砖,放牧期间水和盐分舔砖足量供应。每个放牧小区设置一个遮阳棚,供放牧滩羊休息。

1.3 植物地上生物量测定 在2021年8月31日和9月31日对各小区进行植物取样。在每个小区补播草地区域与原生植被区域移动围笼内、外,分别设置1 m×1 m的样方。分别将样方内每种植物齐地面刈割后,装入纸袋带回实验室。植物样品105℃杀青30 min后,在65℃烘箱内连续烘干48 h,至恒重。

1.4 选择性指数计算 放牧家畜对草地不同植物的食性通过间接差额法计算^[13-14]。通过笼内/笼外法测定放牧家畜的总采食量(daily intake)^[15],分别计算不同植物种类的相对采食量(relative intake)^[14]。根据每个植物种的相对采食量与笼内该植物相对生物量的比值,计算每种植物的选择性指数:

$$\text{选择性指数(selectivity index)} = \frac{\text{相对采食量}}{\text{相对生物量}}$$

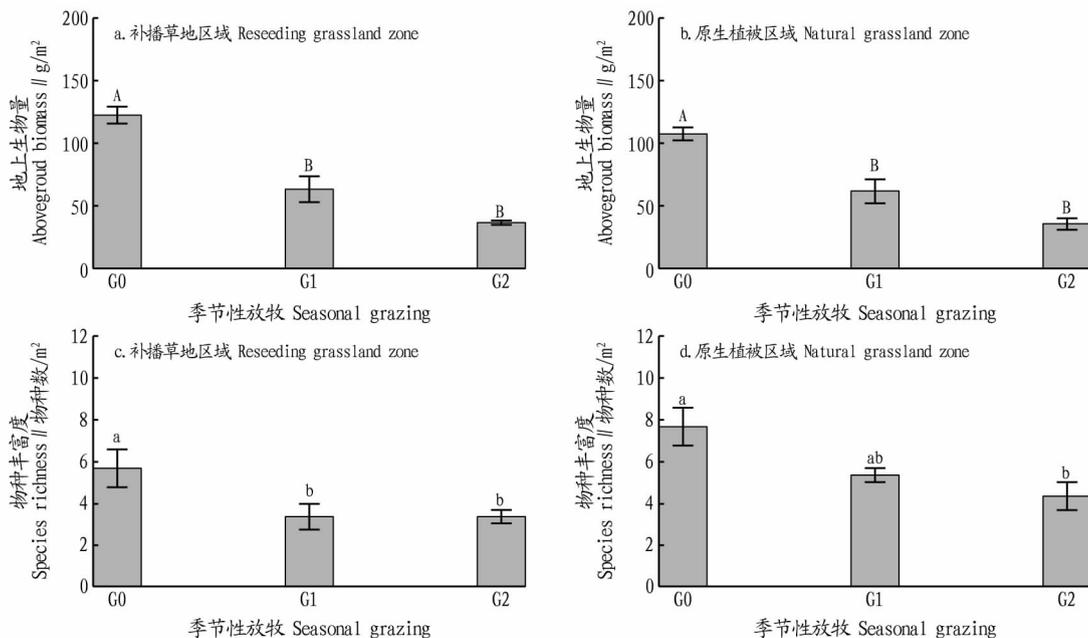
1.5 数据统计分析 使用Excel软件进行数据录入与指标

计算。采用 SPSS 21.0 进行单因素方差分析 (One-way ANOVA), 检验不同季节性放牧处理对补播草地区域与原生植被区域群落地上生物量、物种丰富度、优势植物地上生物量的影响。处理间采用 Tukey HSD 法进行多重比较。数据以平均值标准误表示, 作图采用 Sigmaplot 10.0 软件。

2 结果与分析

2.1 季节性放牧对补播改良荒漠草原地上生物量及物种丰富度的影响

由图 2 可知, 季节性放牧处理显著降低荒漠草



注: G0, 禁牧处理; G1, 夏季放牧处理; G2, 夏秋放牧处理; 不同大写和小写字母分别表示不同处理间差异极显著 ($P < 0.01$) 和差异显著 ($P < 0.05$)。
Note: G0, No grazing; G1, Summary grazing; G2, Summary-autumn grazing; Different capital and lowercase letters indicate significant difference at 0.01 and 0.05 respectively.

图 2 季节性放牧对补播草地区域 (a, c) 和原生植被区域 (b, d) 群落地上生物量 (a, b) 与物种丰富度 (c, d) 的影响

Fig.2 Effects of seasonal grazing on aboveground biomass (a, b) and species richness (c, d) in reseeded grassland zone (a, c) and natural grassland zone (b, d)

2.2 季节性放牧对补播草地区域与原生植被区域优势植物地上生物量的影响

由图 3 可知, 季节性放牧均显著降低补播草地区域蒙古冰草 (*A. mongolicum*)、达乌里胡枝子 (*L. davurica*) 与沙打旺 (*A. adsurgens*) 地上生物量 (图 3)。与禁牧处理相比, 夏季放牧处理对蒙古冰草 (*A. mongolicum*) 地上生物量无显著影响 (图 3a), 但显著降低达乌里胡枝子 (*L. davurica*) 与沙打旺 (*A. adsurgens*) 地上生物量 (图 3b, c)。由图 3~4 可知, 夏季放牧对蒙古冰草 (*A. mongolicum*) 地上生物量无显著影响; 夏秋放牧显著抑制蒙古冰草 (*A. mongolicum*) 地上生物量。夏季放牧与夏秋放牧处理对牛枝子 (*L. potaninii*) 地上生物无显著影响 (图 4b, $P > 0.05$)。

2.3 季节性放牧对优势植物选择性指数的影响

由图 5 可知, 夏季放牧处理下, 补播草地区域蒙古冰草 (*A. mongolicum*)、达乌里胡枝子 (*L. davurica*) 与沙打旺 (*A. adsurgens*) 具有相似的选择性指数 (图 5a)。放牧前期 (2021 年 8 月) 与放牧后期 (2021 年 9 月) 补播草地区域优势植物选择性指数无显著变化 (图 5 a, c)。原生植被区域, 放牧前期放牧家畜喜食牛枝子 (*L. potaninii*), 对蒙古冰草 (*A. mongolicum*) 不喜食 (图

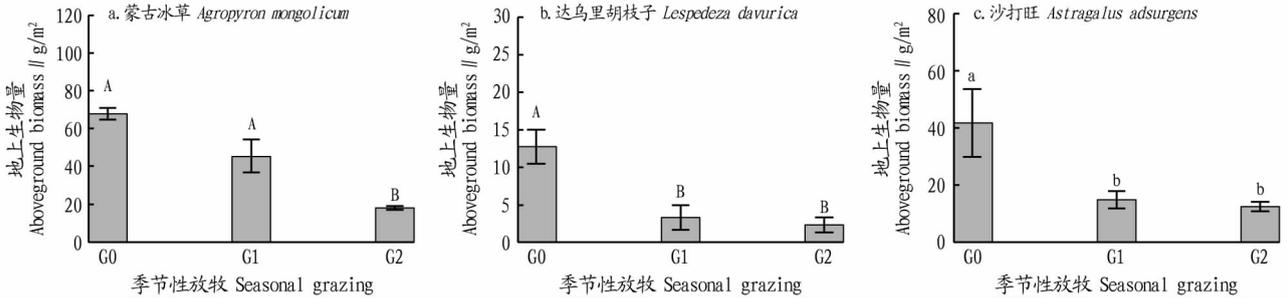
原补播草地区域与原生植被区域植物群落地上生物量 (图 2a、b, $P < 0.01$)。与禁牧处理相比, 夏季放牧与夏秋放牧处理分别降低补播草地区域植物群落地上生物量 48.69% 与 70.41% (图 2a); 原生植被区域, 夏季放牧与夏秋放牧处理则分别降低 42.53% 与 66.90% (图 2b), 且夏季放牧与夏秋放牧处理间无显著差异。季节性放牧处理显著降低补播草地区域物种丰富度 (图 2c, $P < 0.05$)。与禁牧处理相比, 夏秋放牧处理显著降低原生植被区域物种丰富度 43.94% (图 2d, $P < 0.05$)。

5b); 放牧后期, 放牧家畜对二者均喜食 (图 5d)。

3 讨论

天然草原产草量存在明显的季节动态, 季节性放牧通过调整放牧时间能够有效利用天然草原植物资源, 进而实现草畜平衡^[16]。该研究发现, 夏秋连续放牧均不利于补播草地区域与原生植被区域植物群落地上生物量及物种丰富度。然而, 夏季放牧能有效缓解连续放牧的不利影响。上述研究结果说明, 夏季放牧后, 植物群落地上生物量与物种丰富度在生长季后期迅速恢复。秋季休牧有利于天然草原植物群落生产力与多样性的恢复^[17], 与该研究的结果一致。秋季休牧可能通过减少家畜对植物养分回流和植物种子的干扰, 进而可能利于天然草原植物群落恢复。

优势植物是影响天然草原生产力与多样性形成的重要因素之一。质量比假说认为, 与多样性相比, 优势种因其在群落中较高的生物量占比, 能够影响草地生态系统的生产功能^[18-19]。该研究发现, 季节性放牧能够强烈影响补播草地区域与原生植被区域优势植物地上生物量累积; 夏秋连续放牧降低蒙古冰草 (*A. mongolicum*)、达乌里胡枝子 (*L. davurica*) 与

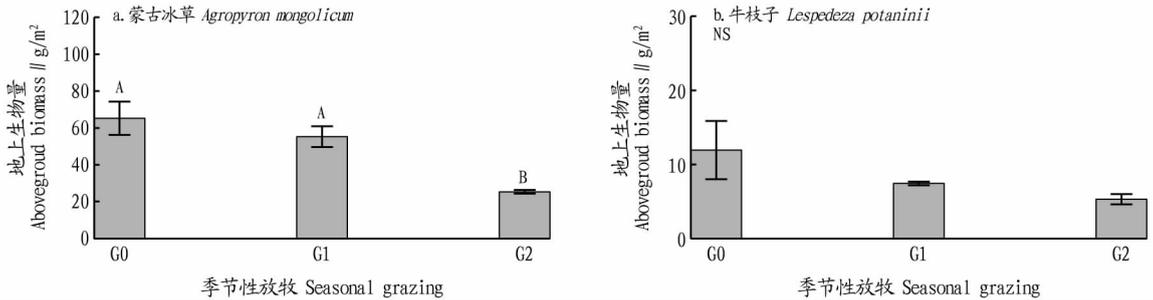


注: G0, 禁牧处理; G1, 夏季放牧处理; G2, 夏秋放牧处理; 不同大写和小写字母分别表示处理间差异极显著 ($P < 0.01$) 和差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: G0, No grazing; G1, Summary grazing; G2, Summary-autumn grazing; Different capital and lowercase letters indicate significant difference at 0.01 and 0.05 respectively.

图3 季节性放牧对补播草地区域优势植物地上生物量的影响

Fig.3 Effects of seasonal grazing on the aboveground biomass of dominant species in reseeding grassland zone

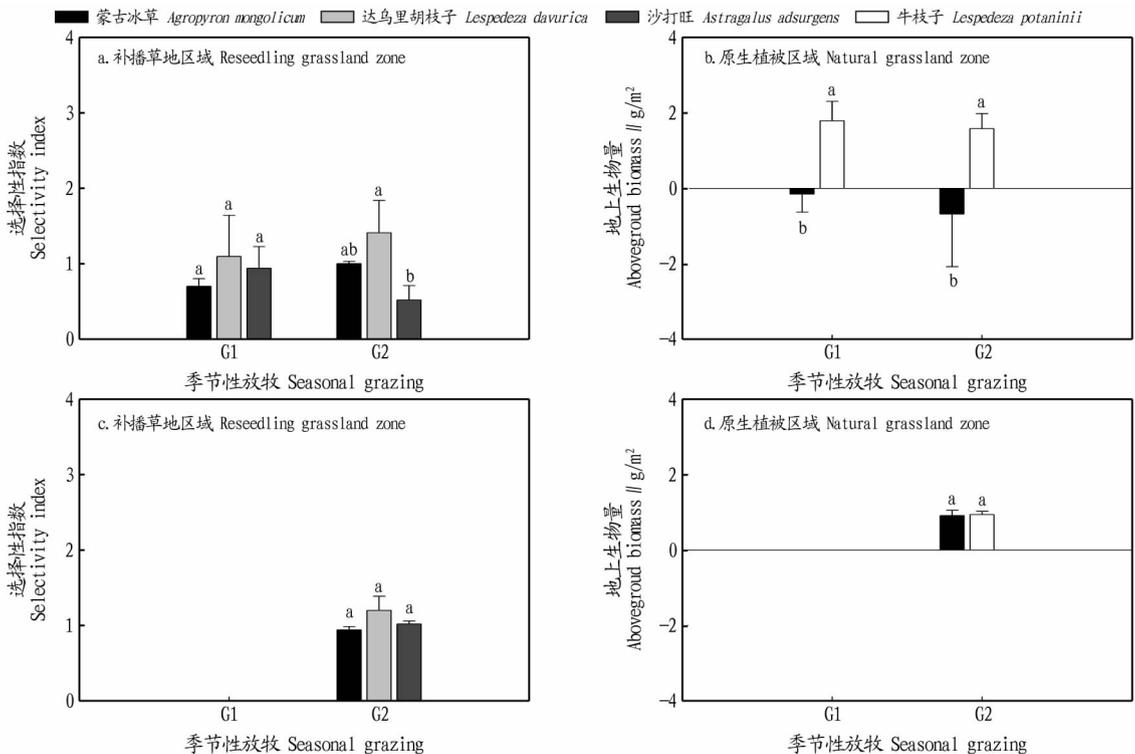


注: G0, 禁牧处理; G1, 夏季放牧处理; G2, 夏秋放牧处理; 不同大写字母表示处理间差异极显著 ($P < 0.01$)。

Note: G0, No grazing; G1, Summary grazing; G2, Summary-autumn grazing; Different capital letters indicate significant difference at 0.01.

图4 季节性放牧对原植被区域优势植物地上生物量的影响

Fig.4 Effects of seasonal grazing on the aboveground biomass of dominant species in natural grassland zone



注: G1, 夏季放牧处理; G2, 夏秋放牧处理。不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: G1, Summary grazing; G2, Summary-autumn grazing. Different lowercase letters indicate significant difference at 0.05.

图5 季节性放牧对优势植物择食指数的影响

Fig.5 Effects of seasonal grazing on the selectivity index of dominant plants

沙打旺 (*A. adsurgens*) 的地上生物量。放牧家畜的选择性采食与草地植物的高度和盖度密切相关^[20], 蒙古冰草 (*A. mongolicum*)、达乌里胡枝子 (*L. davurica*) 与沙打旺 (*A. adsurgens*) 的“上繁草型”结构, 可能更有利于放牧家畜采食。汪诗平^[15]、王旭等^[21]研究表明, 放牧家畜对豆科 (*Leguminosae*)、菊科 (*Compositae*) 等杂类草的喜食程度高于禾本科 (*Poaceae*) 植物。与前人研究结果一致, 在原生植被区域放牧初期家畜喜食牛枝子 (*L. potaninii*), 对蒙古冰草 (*A. mongolicum*) 不喜食, 放牧后期放牧家畜对二者均喜食。牛枝子 (*L. potaninii*) 属于低矮植物 (高度 < 5 cm), 具有典型的“匍匐型”特征, 该特征能有效躲避放牧家畜的采食。该研究也发现夏季放牧与夏秋放牧未显著影响牛枝子 (*L. potaninii*) 地上生物量。

退化草原补播改良已成为我国天然草原修复的关键措施之一^[16]。在草原补播实践过程中, 补播草种的选择是决定草原改良是否成功的关键环节。该研究发现, 夏季放牧与夏秋放牧均不利于“上繁草”型豆科植物达乌里胡枝子 (*L. davurica*) 与沙打旺 (*A. adsurgens*) 的生长。然而, 牛枝子 (*L. potaninii*) 枝条匍匐生长, 本身具有的“避牧型”特征能够有效缓解放牧的不利影响。因此, 荒漠草原放牧草地补播改良实践过程中, 宜多采用牛枝子 (*L. potaninii*) 等“避牧型”豆科牧草品种。

4 结论

夏季放牧与夏秋放牧都显著降低补播改良荒漠草原植物群落地上生物量与物种丰富度。夏季放牧后, 草原地上生物量与物种丰富度能够一定程度的恢复。荒漠草原放牧草地, 不宜补播“上繁型”豆科牧草达乌里胡枝子 (*L. davurica*) 与沙打旺 (*A. adsurgens*)。在荒漠草原, 乡土牧草牛枝子 (*L. potaninii*) 能有效抵抗夏季放牧与夏秋放牧的不利影响。综上所述, 与夏秋放牧相比, 夏季放牧可作为补播改良草原较优放牧模式。在后续补播改良荒漠草原放牧利用试验中, 应进一步关注补播“避牧型”豆科植物对放牧家畜的季节性响应过程, 为温性荒漠草原适应性管理与合理利用提供一定科学依据。

(上接第 52 页)

[32] REINHARD J, ZAH R. Consequential life cycle assessment of the environmental impacts of an increased rapemethylester (RME) production in Switzerland [J]. *Biomass and bioenergy*, 2011, 35(6): 2361–2373.

[33] 黄锦法, 曹志洪, 石艳平, 等. 浙江嘉兴平原土地利用变化对农林固碳生态功能的影响分析 [J]. *农业环境与发展*, 2013, 30(4): 19–23.

[34] 韩冰, 王效科, 逯非, 等. 中国农田土壤生态系统固碳现状和潜力 [J]. *生态学报*, 2008, 28(2): 612–619.

[35] 刘晓永, 李书田. 中国秸秆养分资源及还田的时空分布特征 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33(21): 1–19.

[36] 朱建春, 李荣华, 杨香云, 等. 近 30 年来中国农作物秸秆资源量的时空分布 [J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2012, 40(4): 139–145.

[37] 朱纯明. 河南省秸秆生物质资源量测算 [J]. *现代农业科技*, 2011(7): 292–294.

参考文献

- [1] 岳丽楠, 师尚礼, 祁娟, 等. 免耕补播对北方退化草地生产力及营养品质的影响 [J]. *草地学报*, 2021, 29(11): 2583–2590.
- [2] 王占军, 蒋齐, 吴旭东, 等. 不同干扰方式对宁夏荒漠草原土壤水分与植被群落的影响 [J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2020(24): 103–107.
- [3] 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.
- [4] 郭艳菊, 马晓静, 许爱云, 等. 宁夏东部风沙区沙化草地土壤水分和植被的空间特征 [J]. *生态学报*, 2022, 42(4): 1571–1581.
- [5] MSADDEK J, TLILI A, MOUNINI M, et al. Community diversity, functional traits and adaptation of *Stipa tenacissima* L. under different grazing regimes in a North African arid montane rangeland [J]. *African journal of range & forage science*, 2021, 38(1): 122–129.
- [6] 任继周, 王钦, 牟新待, 等. 草原生产流程及草原季节畜牧业 [J]. *中国农业科学*, 1978, 11(2): 87–92.
- [7] 包秀霞, 廉勇, 易津, 等. 放牧方式对小针茅荒漠草原植物群落多样性的影响 [J]. *安徽农业科学*, 2014, 42(3): 783–785, 805.
- [8] 刘进娣, 马红彬, 周瑶, 等. 轮牧时间对荒漠草原土壤种子库特性的影响 [J]. *应用生态学报*, 2021, 32(7): 2378–2388.
- [9] 白正, 李艳龙, 石椿瑛, 等. 季节放牧对典型草原植物群落不同生长季特征的影响 [J]. *中国草地学报*, 2020, 42(2): 67–75.
- [10] 张浩, 蔡金宏, 罗建川, 等. 休耕对无芒雀麦改良草甸草原牧草生长速率及现存量与营养品质的影响 [J]. *草原与草坪*, 2020, 40(1): 1–10.
- [11] 张晓玲, 徐田伟, 谭攀柱, 等. 季节放牧对高寒草原植被群落和生物量的影响 [J]. *西北农业学报*, 2019, 28(10): 1576–1582.
- [12] 买小虎, 张玉娟, 张英俊, 等. 季节性放牧调控对草地植被的影响 [J]. *西北农业学报*, 2014, 23(3): 24–30.
- [13] WAN H W, BAI Y F, HOOPER D U, et al. Selective grazing and seasonal precipitation play key roles in shaping plant community structure of semi-arid grasslands [J]. *Landscape ecology*, 2015, 30(9): 1767–1782.
- [14] 林斐. 典型草原不同放牧强度及放牧方式下牛羊食性选择研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2017.
- [15] 汪诗平. 不同放牧季节绵羊的食性及食物多样性与草地植物多样性的关系 [J]. *生态学报*, 2000, 20(6): 951–957.
- [16] ZHANG Y J, HUANG D, BADGERY W B, et al. Reduced grazing pressure delivers production and environmental benefits for the typical steppe of north china [J]. *Scientific reports*, 2015, 5: 1–11.
- [17] 张浩. 短期休耕对无芒雀麦改良草地植被和家畜生产的影响机制 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2019.
- [18] GRIME J P. Benefits of plant diversity to ecosystems: Immediate, filter and founder effects [J]. *Journal of ecology*, 1998, 86(6): 902–910.
- [19] REN H Y, SCHÖNBACH P, WAN H W, et al. Effects of grazing intensity and environmental factors on species composition and diversity in typical steppe of Inner Mongolia, China [J]. *PLoS One*, 2012, 7(12): 1–10.
- [20] CHEN W Q, WANG X Y, ZHANG Y J, et al. Effects of the vertical and horizontal availability of food resources: The diet selection of sheep grazing on natural grassland [J]. *The journal of agricultural science*, 2015, 153(2): 322–334.
- [21] 王旭, 王德利, 刘颖, 等. 不同放牧率下绵羊的采食量与食性选择研究 [J]. *东北师大学报 (自然科学版)*, 2002, 34(1): 36–40.
- [38] 张福春, 朱志辉. 中国作物的收获指数 [J]. *中国农业科学*, 1990, 23(2): 83–87.
- [39] 崔明, 赵立欣, 田宜水, 等. 中国主要农作物秸秆资源能源化利用分析评价 [J]. *农业工程学报*, 2008, 24(12): 291–296.
- [40] 王海东, 李翠霞. 黑龙江省秸秆类生物质能源储量测度 [J]. *生态经济*, 2009, 25(11): 128–130, 144.
- [41] 丁文斌, 王雅鹏, 徐勇. 生物质能源材料: 主要农作物秸秆产量潜力分析 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2007, 17(5): 84–89.
- [42] 中国农业部/美国能源部项目专家组. 中国生物质资源可获得性评价 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1998.
- [43] LIU W G, XU J M, XIE X F, et al. A new integrated framework to estimate the climate change impacts of biomass utilization for biofuel in life cycle assessment [J]. *Journal of cleaner production*, 2020, 267: 1–10.
- [44] 中国城市温室气体工作组. 中国产品全生命周期温室气体排放系数集 (2022) [M]. 北京: 中国环境出版集团, 2022.