

温性草甸草原羊草功能性状对不同放牧强度的响应

陈瑜¹, 杨晨晨¹, 潮洛濛^{1,2*}, 周延林^{1,2}, 呼格吉勒图^{1,2}, 王超然¹, 贾明¹

(1. 内蒙古大学生态与环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010021; 2. 蒙古高原生态学与资源利用教育部重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010021)

摘要:【目的】研究锡林郭勒盟温性草甸草原建群种羊草(*Leymus chinensis*)茎叶性状在羊放牧干扰下的响应机制和相关关系。【方法】设置四个不同放牧强度(禁牧、轻度放牧、中度放牧、重度放牧)处理,测定锡林郭勒盟温性草甸草原羊草个体生长特征性状,量化分析羊草茎叶对不同放牧强度的响应,研究其关系、变化规律及其影响因素。【结果】随着放牧强度增加,温性草甸草原羊草重要值下降,植株出现矮小化,其株高、单株重、叶片数、叶宽和总叶面积减少;羊草地上生物量与株高、茎干重、叶干重和总叶面积显著正相关,而与叶片数无显著相关。轻度和中度放牧对羊草叶长有促进作用,而重度放牧对叶长有抑制作用。轻度放牧增加羊草比叶面积,中度放牧与禁牧比叶面积相差较小,但重度放牧时比叶面积显著减少。【结论】Corner法则同样适用于草原植物,轻度、中度放牧下叶性状较为敏感,并出现补偿现象,重度放牧下个体生长特征性状较为敏感。

关键词:温性草甸草原;放牧梯度;羊草;茎叶关系;Corner法则

中图分类号:S812.8 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2023)02-0143-09

DOI:10.13817/j.cnki.cycp.2023.02.017



羊草(*Leymus chinensis*)是欧亚温带草原东缘的主要优势植物,也是锡林郭勒温性草甸草原的建群种,普遍分布于温性草甸草原、典型草原。作为家畜主要适口牧草之一,羊草在温性草甸草原中具有很强的放牧表型反应^[1]。温性草甸草原是我国珍贵的自然再生资源,其中内蒙古温性草甸草原占比最大,主要分布于呼伦贝尔市和锡林郭勒盟,大部分是放牧场。

放牧作为草原最主要的干扰形式,它改变了草原群落的组成和结构,种群大小、个体形态^[2]。过度放牧使草地生产力持续衰减,严重影响草地生态系统的结构和功能^[3]。

植物功能性状的形成是气候、环境和生物条件共同筛选的结果^[4],茎叶性状及关系反映植物对生长环境的响应和适应,且将环境、植物个体和生态系统结构、过程与功能联系起来^[1]。通常来讲,植物生长可利用的资源是有限的,当植物对某一性状的投资较多时,必然会导致对其他性状的投资减少,即牺牲其他性状的构建及功能维持,采取此消彼长的资源权衡策略,在植物的功能性状间进行最优资源配置^[5]。Corner^[6]在1949年提出,单位面积的枝条支撑的叶面积和叶量是一定的,即枝叶间呈正相关关系,树枝分叉越密分梢越细,国内外研究均有论证^[7-9]。

从茎叶性状关系的角度研究羊草在放牧干扰下的资源平衡有重要的生态学意义。潘琰等^[10]的研究表明在温带典型草原毛登牧场羊草表现出更强的避

收稿日期:2022-01-10; **修回日期:**2022-04-16

基金项目:内蒙古自治区应用研发资金项目“内蒙古主要草原类型碳减排关键技术集成与示范”(2019GG014);国家重点计划研发课题“锡林郭勒草甸草原持续稳定恢复技术与模式”(2016YFC0500604);国家自然科学基金“基于生物多样性保护的资源型城市景观生态安全格局”(31060117)

作者简介:陈瑜(1996-),女,天津人,硕士研究生。

E-mail:cy1573257@163.com

*通信作者。E-mail:colmavn@aliyun.com

牧性与耐牧性。科尔沁沙质草地上,禾本科植物的平均盖度对重牧敏感,随放牧强度的增加牧草高度有规律的降低,多年生牧草的高度对放牧强度最敏感^[11]。蒙旭辉等^[12]在呼伦贝尔草甸草原研究得出,中度放牧对家畜喜食的羊草有抑制作用,随着放牧强度的加大,羊草草地有向退化演替方向发展的趋势。李西良等^[1]在呼伦贝尔草甸草原研究发现羊草出现矮小化,并提出茎质量、总质量、茎高、株高、叶面积等为对放牧响应的敏感性状。侯路路等^[13]在呼伦贝尔草甸草原的研究认为羊草植株性状随放牧强度增加而降低。使用不同家畜放牧造成的影响也不尽相同,如羊对禾本科牧草有较高的选择性,而牛对植物的选择性较低^[14],但是牛粪覆盖草地后分解周期长,容易造成草地物种的黄化和死亡对草地的影响较大^[15]。而不同体型和质量的哺乳类食草动物对草地的践踏程度也不同,这些均会对植物群落高度、覆盖度等结构特征造成差异化的影响^[16]。

研究草原建群种在不同放牧强度下茎叶关系的变化,对揭示草原生态的放牧响应机制有重要意义。Corner法则的枝叶关系是否同样适用于草本植物的茎叶关系,其他草甸草原羊草茎叶性状随放牧强度的变化趋势^[1,12,17]是否与以羊草为建群种的锡林郭勒盟温性草甸草原具有趋同性?温性草甸草原建群种茎叶性状对放牧强度的响应及其间关系如何?针对以上问题,本研究以内蒙古西乌珠穆沁旗温性草甸草原样地为研究对象,使用乌珠穆沁羯羊放牧,设置4个放牧梯度,通过研究放牧对羊草整株和叶性状的影响,羊草功能性状间关系,揭示锡林郭勒盟温性草甸草原羊草茎叶性状对放牧强度的响应和,为温性草甸草原合理放牧提供科学依据和方法。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

试验区位于锡林郭勒盟西乌珠穆沁旗宝日嘎斯台(E 118°93', N 45°04'),地处大兴安岭北麓,中纬度内陆地区,蒙古地槽东南。土壤以栗钙土为主,大陆性半湿润半干旱气候,冬春寒冷漫长,夏秋雨热同期,阳光充足。年平均气温1℃,年日均气温5℃的持续期142 d,年日均气温0℃的持续期182 d,霜期达259 d,年均降水量345 mm,最多550 mm,最少210 mm。

该试验地属于温性草甸草原,群落优势种由贝加尔针茅(*Stipa Baicalensis*)、羊草以及糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)共同组成,伴生种有黄囊苔草(*Carex korshinskyi*)、西伯利亚羽茅(*Achnatherum sibiricum*)等。

1.2 试验设计

于2016年生长季实地调查试验样地情况,次年5月在围封样地按照随机区组试验法布置不同放牧强度试验样地(图1)。试验地以放牧时长控制放牧强度,为单因素控制试验,选用50 kg左右健康的2岁乌珠穆沁羯羊,从2017年6月开始,连续4年于每年6—9月放牧。试验采用完全随机区组设计,根据当地草地载畜量将放牧强度设置为禁牧(No grazing, NG)、轻度放牧(Light grazing, LG),1.48羊单位/(hm²·生长季),即1只羊每月放牧7 d、中度放牧(Moderate grazing, MG),2.46羊单位/(hm²·生长季),即1只羊每月放牧12 d、重度放牧(Heavy grazing, HG),3.44羊单位/(hm²·生长季),即1只羊每月放牧17 d。本试验中所指的生长季为6—9月,试验共设置4个处理,每个处理3个重复,共12个小区,每个小区面积400 m×400 m,小区间距10 m。

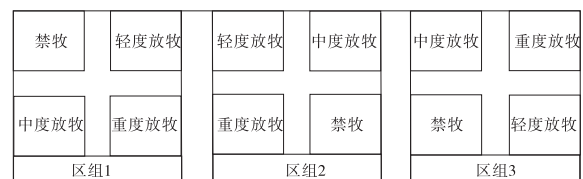


图1 试验设计图

Fig. 1 Experimental design

1.3 取样方法

于2020年8月中旬进行取样,在每个处理小区随机选取2个1 m×1 m的样方,即每个处理6个1 m²样方,进行群落调查,记录植物高度、盖度、多度、生物量,计算羊草重要值。

重要值(IV)=(相对多度+相对高度+相对干重)/3

相对多度是指某植物种的个体数所占群落种类总个体数的百分率,相对高度是指个体高度占群落种类高度平均值的百分率,相对干重是指植株干重占群落种类干重平均值的百分率。

每个处理小区,随机选取10株羊草(以羊草地上株数计量),用卷尺测量自然高度,将植株地上部齐地

刈割带回实验室。

(1)株高(Plant height, PH):野外用卷尺测量自然高度;

(2)单株重(Plant weight, PW):65℃烘干至恒重后用精度0.01 g的电子天平称取植株干生物量;

(3)茎干重(Stem weight, SDW):单株羊草全部茎的干质量;

(4)叶干重(Leaf weight, LDW):单株羊草全部叶的干质量;

(5)茎叶比(Stem to leaf ratio, SLR):整株羊草茎质量与整株羊草总叶质量的比值;

(6)叶长(Leaf length, LL):用便携式叶面积仪(LI-3000C, Li-Cor, Lincoln, NE, USA)扫描获得数据,整株羊草所有叶片的长度之和;

(7)叶宽(Leaf wide, LW):用便携式叶面积仪扫描获得数据,整株羊草所有叶片的叶宽之和。

(8)长宽比(Length to weight ratio, LWR):整株羊草叶长和叶宽的比值

(9)总叶面积(Total leaf area, TLA):整株羊草所有叶片的叶面积之和;

(10)比叶面积(Specific leaf area, SLA):整株羊草总叶面积与整株羊草总叶质量的比值。

1.4 数据处理与分析

用SPSS计算数据误差值,并进行One-way ANOVA差异性检验,采用GraphPad Prism9检验结果并制作柱状图,用R. 3. 5. 1进行试验各指标的Pearson相关分析和主成分分析,分析放牧强度对各指标

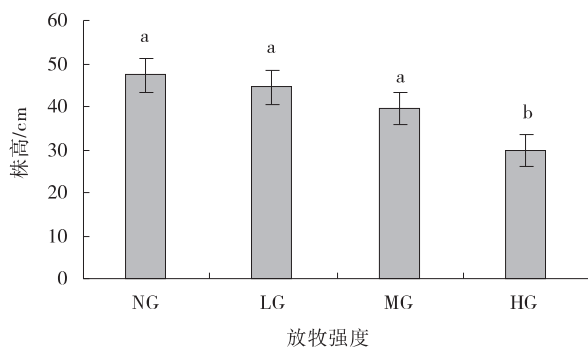


图3 放牧强度下羊草株高和单株重

Fig. 3 Height and plant weight of *Leymus chinensis* under different grazing intensity

羊草茎干重随放牧强度增加而降低,但在轻度放牧样地中,羊草茎干重的降低不显著;中度放牧的羊草茎干重显著低于禁牧;重度放牧的羊草茎干重显著

的影响。

2 结果与分析

2.1 放牧对羊草种群在群落中重要值的影响

在锡林郭勒温性草甸草原中,羊草种群的重要值随放牧强度增加而降低,重度放牧导致羊草重要值显著降低($P < 0.05$)(图2)。

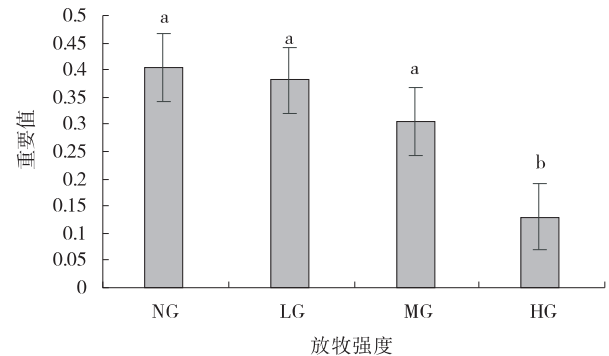


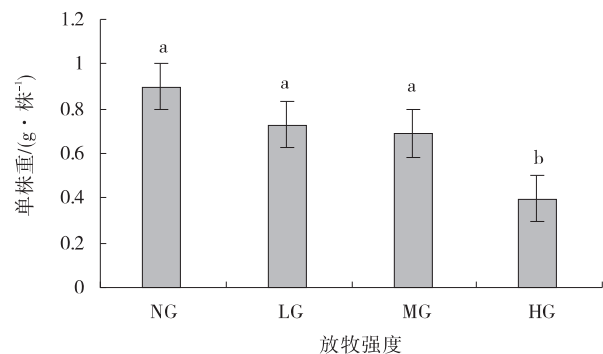
图2 不同放牧强度下羊草重要值

Fig. 2 Important values of *Leymus chinensis* with different grazing intensities

注:图表中,NG代表禁牧,LG代表轻度放牧,MG代表中度放牧,HG代表重度放牧。不同字母表示处理间差异达到显著水平($P < 0.05$),误差线表示平均值±标准误。下同

2.2 放牧对羊草个体生长特征性状的影响

羊草株高和单株重随放牧强度增加而降低。不同放牧强度对温性草甸草原羊草个体生长特征的影响均不相同。相比禁牧样地,轻度放牧和中度放牧羊草株高和单株重虽然降低,但均不显著。与其他样地相比,重度放牧下,羊草株高和单株重显著降低($P < 0.05$)(图3)。



低于其他3个处理。随放牧强度增加羊草叶干重的变化趋势没有规律,禁牧下羊草叶干重最高,达0.52 g/株;轻度放牧导致叶片干重下降,但不显著;中度放

牧叶干重略高于轻度放牧,也不显著;而重度放牧与其他放牧强度相比显著降低($P<0.05$)(图4)。

各放牧强度下的羊草茎叶比均小于1,中度放牧的茎叶比最小,与禁牧和轻度放牧相比显著降低17.33%和18.42%($P<0.05$)。根据茎、叶干重占单

株重的比例可以得出,各放牧强度茎干重占单株重的比例均小于叶干重占单株重的比例;随着放牧强度增加,叶干重的比重出现增加趋势,中度和重度放牧的叶干重占单株比重大于60%(图4)。

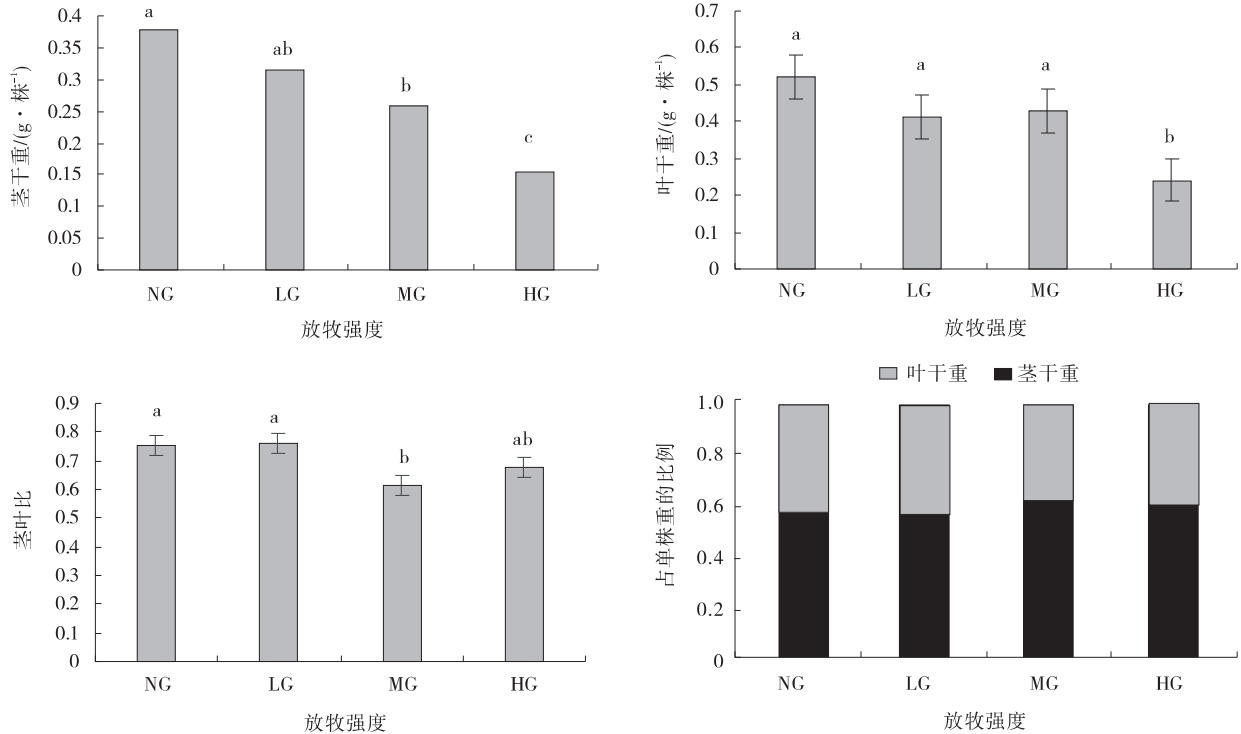


图4 不同放牧强度下羊草个体生长性状

Fig. 4 Individual traits of *Leymus chinensis* under different grazing intensity

2.3 放牧对羊草叶片形态性状的影响

羊草单株叶片数呈现随放牧强度增加而减少的趋势。与禁牧相比,轻度和中度放牧叶片数减少,但没有显著差异;与禁牧和轻度放牧相比,重度放牧的叶片数量显著降低($P<0.05$)(图5)。

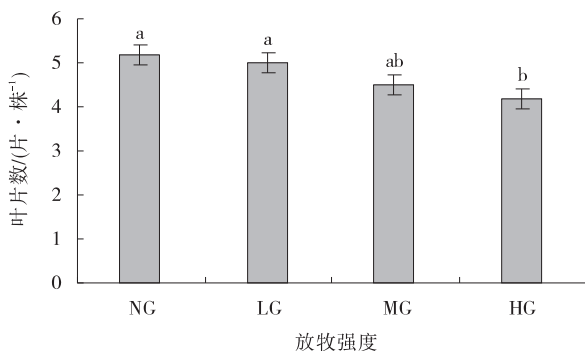


图5 不同放牧强度下羊草叶片数

Fig. 5 Number of leaves of *Leymus chinensis* under different grazing intensity

放牧强度对羊草叶片长度和宽度的影响不同。轻度和中度放牧对羊草叶长有显著促进作用,而重度放牧对羊草叶长有显著抑制作用。轻度和中度放牧比禁牧的叶长显著增加了26.08%和25.37%,重度放牧比禁牧的叶长显著减少了21.81%($P<0.05$)。随放牧强度增加,羊草叶宽出现降低趋势,重度放牧下叶宽显著降低($P<0.05$)。随着放牧强度增加,羊草叶片长宽比也出现增加趋势,3个放牧强度叶片长宽比均显著高于禁牧($P<0.05$)(图6)。

随放牧强度增加羊草单株总叶面积呈降低趋势,重度放牧样地总叶面积显著低于其他处理($P<0.05$)(图7)。

轻度放牧增加羊草比叶面积,但不显著;除了禁牧外,随着放牧强度增加,比叶面积呈现下降趋势,轻度、中度放牧与禁牧的比叶面积差异不显著,与重度放牧差异显著($P<0.05$)(图7)。

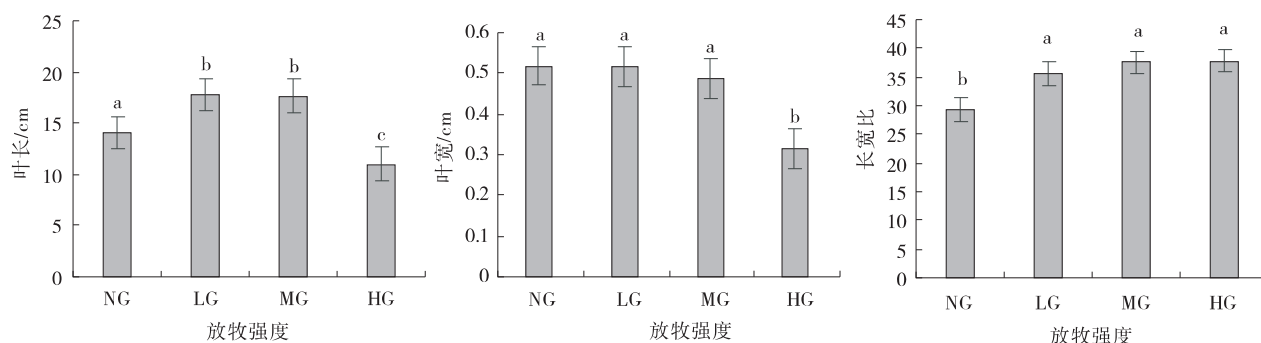


图 6 不同放牧强度下羊草的叶长、叶宽和长宽比

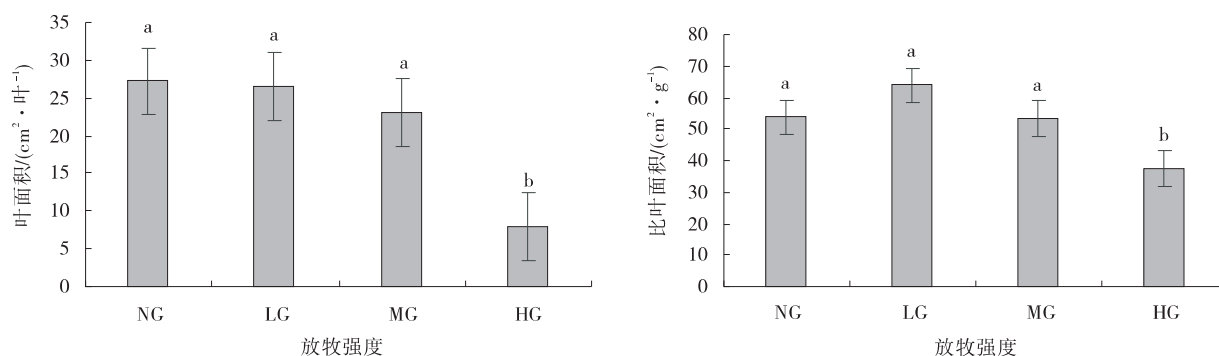
Fig. 6 Leaf length, leaf width and length/width of *Leymus chinensis* under different grazing intensity

图 7 不同放牧强度下羊草的总叶面积和比叶面积

Fig. 7 Total leaf area and specific leaf area of *Leymus chinensis* under different grazing intensity

2.4 羊草功能性状与不同放牧强度羊草单株重的关系

羊草单株重与株高在禁牧样地呈显著正相关,在轻度、中度和重度放牧样地呈极显著正相关($P < 0.01$)(表 1)。羊草单株重与茎干重、叶干重在不同放牧强度均具有极显著正相关关系。在不同放牧强度样地,羊草单株重与叶片数之间无显著正相关关系,与总叶面积具有显著正相关关系,且在轻度、中度和重度放牧处理样地中呈极显著相关($P < 0.01$)。轻度、中度放牧下,叶长和叶宽与单株重呈正相关关系。

2.5 羊草不同功能性状间的相关关系

研究羊草个体植株和叶片形态性状间的相关性,显示羊草茎叶比和叶片长宽比与各指标均无显著相关,故本表格没有出现。由相关性可知,羊草个体生长特征性状之间存在显著相关关系,且羊草株高与其他茎叶性状均相关,其中株高和茎干重相关性最高,达 0.869($P < 0.01$)(表 2)。

羊草叶片形态性状中,叶长、叶宽、总叶面积和比叶面积之间存在显著相关关系;叶片数仅与总叶面积相关外,与其他叶片形态性状不相关;总叶面积与其

表 1 羊草不同功能性状与单株重的相关性

Table 1 Correlation between different functional traits and plant weight of *Leymus chinensis*

| 指标 | 单株重/(g·株 ⁻¹) | | | |
|------|--------------------------|--------|--------|--------|
| | NG | LG | MG | HG |
| 株高 | 0.80* | 0.91** | 0.87** | 0.83** |
| 茎干重 | 0.94** | 0.95** | 0.90** | 0.87** |
| 叶干重 | 0.98** | 0.95** | 0.97** | 0.97** |
| 叶片数 | 0.54 | 0.31 | 0.26 | 0.48 |
| 叶长 | 0.001 | 0.65* | 0.74* | 0.29 |
| 叶宽 | 0.67 | 0.72* | 0.79* | 0.04 |
| 总叶面积 | 0.84* | 0.80** | 0.96** | 0.82** |

注:**在 0.01 水平(双侧)上显著相关,*在 0.05 水平(双侧)上显著相关,下同

他叶片形态性状相关性均值最大,其中总叶面积和叶宽相关性最高,达 0.877($P < 0.01$)(表 2)。

株高与所有叶片形态性状均有显著相关性。除株高外,其他个体生长特征性状与比叶面积均不相关,但与其他叶片形态性状有显著相关性,说明羊草个体生物量的变化受多种因素共同的协调作用(表 2)。

表2 羊草不同功能性状间的相关性

Table 2 Correlation between different functional traits of *Leymus chinensis*

| 指标 | 株高 | 叶片数 | 叶干重 | 茎干重 | 单株干重 | 总叶面积 | 比叶面积 | 叶长 | 叶宽 |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----|
| 叶片数 | 0.522** | 1 | | | | | | | |
| 叶干重 | 0.798** | 0.560** | 1 | | | | | | |
| 茎干重 | 0.869** | 0.518** | 0.868** | 1 | | | | | |
| 单株干重 | 0.856** | 0.561** | 0.976** | 0.955** | 1 | | | | |
| 总叶面积 | 0.804** | 0.515** | 0.844** | 0.814** | 0.859** | 1 | | | |
| 比叶面积 | 0.346* | 0.102 | 0.119 | 0.239 | 0.176 | 0.607** | 1 | | |
| 叶长 | 0.525** | 0.154 | 0.400* | 0.336* | 0.385* | 0.616** | 0.575** | 1 | |
| 叶宽 | 0.746** | 0.179 | 0.745** | 0.744** | 0.769** | 0.877** | 0.561** | 0.535** | 1 |

进一步分析羊草不同功能性状与放牧强度的关系,根据主成分分析可知,第一主成分(PC1)可以解释78.89%的变量,第二主成分(PC2)解释15.51%的变量,PC1很大程度取决于中度放牧,PC2与禁牧和轻度放牧有密切关系。

在轻度放牧下,羊草功能性状中比叶面积、叶长与之有正相关关系,按顺序为叶宽、总叶面积、叶干重、株高、单株干重、茎干重、叶片数,而茎叶比和叶片长宽比为最后。中度放牧强度时,相关关系较大的是叶长和长宽比,其他功能性状按顺序为比叶面积、叶宽、总叶面积、叶干重、株高、单株干重、茎干重、叶片数和茎叶比。重度放牧下,正相关关系较大是茎叶比和长宽比,其次是叶片数、茎干重、单株干重、株高、叶干重、总叶面积、叶宽、叶长,而比叶面积与重度放牧完全相反。综上所述,本研究中比叶面积随着放牧强度增加,与放牧强度的正相关关系减小。

3 讨论

3.1 放牧干扰下羊草矮小化和光合产物分配策略

放牧改变群落结构,并导致羊草重要值发生变化,在锡林郭勒温性草甸草原中,随放牧强度的增加羊草重要值降低,这与之前的研究结果相同^[13]。在对呼伦贝尔草甸草原的研究中,牛和羊放牧均出现了羊草由于被连续采食出现很难恢复,生活力明显降低的现象^[12-13]。这是由于家畜喜食的牧草生态位收缩,杂草等生态位趁机扩张,使适口牧草分布范围缩减^[18]。

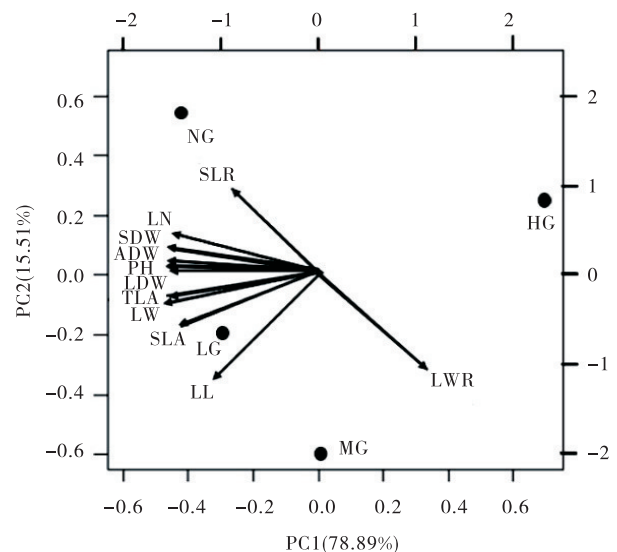


图8 不同放牧强度下羊草功能性状主成分分析

Fig. 8 Principal component analysis of functional traits of *Leymus chinensis*

注:图中,PH代表植株高、LN代表叶片数、LDW代表叶干重、SDW代表茎干重、ADW代表单株干重、SLR代表茎叶比、TLA代表总叶面积、SLA代表比叶面积、LL代表叶长、LW代表叶宽、LWR代表叶片长宽比。

植株高度和地上干生物量是衡量草地生态系统生产力的重要指标之一,随着放牧干扰增加,植物采取降低株高度和生物量的适应策略^[19]。本研究中,在锡林郭勒温性草甸草原的羊草采取矮小化的策略应对放牧强度增加,与之前的研究结果一致^[10-12,17]。个体矮小化为表型可塑性,是生物对环境变化响应的结果^[20-21],羊草个体矮小化为适应放牧干扰提供快速适

应机制。

以往研究证实植物个体矮小化显著降低草原生产力^[3],本研究中3个放牧处理单株重、茎干重和叶干重均小于禁牧,以重度放牧减少最显著,这是由于植物对放牧胁迫并产生避牧机制^[22]。本研究结果表明植物单株茎叶比小于1,说明羊草更偏向于将光合产物分配给叶片^[13],强化固定有机质。此外,随着放牧强度增加,中度放牧和重度放牧的叶干重占单株重的比例超过60%,也说明放牧强度增加,羊草有将光合产物分配给叶片的倾向。

草地上生物量对草原初级生产力和生态结构与功能有重要意义^[23]。由相关关系可知,株高、茎干重、叶干重和总叶面积作为单株重的主要组成部分,与单株重呈正相关关系,这一结果与呼伦贝尔草原羊草单株重的主要影响因素一致^[13]。轻度、中度放牧的单株重还与叶长和叶宽呈显著相关关系,而禁牧和重度放牧单株重与叶长和叶宽无显著相关性,说明适度放牧造成叶片的补偿效应^[24]。

3.2 放牧干扰下羊草叶性状的非对称响应及茎叶关系

叶片是植物合成光合产物的主要器官,之前的研究^[1]认为羊草叶性状对放牧有非对称响应机制。本研究结果表明,温性草甸草原建群种羊草功能性状对放牧的响应变化程度不相同,家畜进食踩踏,导致轻度、中度和重度放牧羊草的总叶面积均有所下降。虽然轻度和中度放牧的羊草总叶面积减少,但叶片数没有显著减少,叶长出现增加趋势,轻度放牧比叶面积也有增加,体现了羊草应对放牧干扰出现补偿机制。重度放牧羊草叶片数量显著减少,叶片变短变窄,总叶面积减小,表现出矮小化现象^[1,13]。叶片长宽比随着放牧强度增加呈增加趋势,3个放牧强度均高于禁牧,轻度和中度放牧由于叶片出现补偿机制导致叶片长宽比增加,而重度放牧叶长和叶宽均减少,叶宽减少量大于叶长减少量,所以叶宽的贡献更大,虽然叶片长宽比增加的机制不同,但都可以增大对光的截获效率,以保证叶片内外能量和物质交换^[18]。比叶面积是最能体现物种生存策略的重要性状之一^[25],比叶面积作为重要的叶性状与植物抗旱性和光合能力紧密相关^[6]。本研究中,轻度放牧羊草比叶面积高于禁牧,中度放牧羊草比叶面积与禁牧相似,这是由于适度放牧

增加比叶面积提高对光资源的利用,保证生长^[13]。而重度放牧下,比叶面积显著减少是由于较低的比叶面积的植物可以有效减小蒸腾和叶片过度失水,这体现出禾本科植物较强的避牧能力^[26]。

放牧是羊草茎叶关系的重要调控因子。本研究中,增加放牧强度导致羊草的株高、叶片数和干重等表型功能性状均呈下降趋势,羊草株高和叶性状中总叶面积与单株重和性状间都有较高的正相关,即羊草茎叶性状存在正相关关系,符合Corner法则^[27]中第一条,说明Corner法则适用于放牧压力下的草本植物,茎叶性状之间的联动响应是放牧下羊草性状可塑性的重要机制^[26],呼伦贝尔草甸草原糙隐子草也有相同现象^[28]。

本研究发现,与轻度和中度放牧呈正相关关系较强的功能性状以叶片形态性状为主,如叶长、比叶面积、总叶面积和叶宽等,然后是个体生长特征功能性状变化,如叶干重、株高、茎干重和单株干重等。符合本研究之前的结论,随着放牧强度的增加光合产物的分配朝叶片分配增加的方向发展,有利于发挥叶片光合作用^[29]。本研究的羊草茎叶比均小于1,轻度和中度放牧处理下羊草叶长高于禁牧,轻度放牧的比叶面积高于禁牧,中度放牧的比叶面积与禁牧相似等结果均说明轻度和中度放牧下羊草出现补偿效应。重度放牧下呈正相关关系较强的功能性状是茎叶比、叶长宽比和叶片数,然后是个体生长特征性状,最后是其叶片形态性状。本研究认为,重度放牧下茎叶比、长宽比、叶片数、株高等个体生长特征性状较为敏感,优先发生变化^[19,28]。轻度、中度放牧与重度放牧造成的功能性状响应差异可能是由于草原植物性状对放牧干扰有一定的弹性,这种弹性可能主要由于与光合作用密切相关的叶片形态性状承担,但需进一步的研究证实。

4 结论

(1) 放牧导致羊草矮小化,在放牧压力下羊草光合产物倾向分配给叶片。

(2) 放牧强度增加导致株高、茎叶干重、叶片数和叶面积等茎叶性状减少。

(3) 生长特征性状中株高是主要影响因素,叶片形态性状中总叶面积是单株重的主要影响因素。

(4) 与轻度和中度放牧呈正相关关系较强的功能性状以叶片形态性状为主,然后是个体生长特征性状与重度放牧呈正相关关系较强的功能性状是茎叶比、叶长宽比和叶片数,然后是个体生长特征性状,最后是叶片形态性状。

参考文献:

- [1] 李西良,侯向阳,吴新宏,等. 草甸草原羊草茎叶功能性状对长期过度放牧的可塑性响应[J]. 植物生态学报,2014,38(5):440-451.
- [2] 张璐,白天晓,郝匕台,等. 季节性放牧对羊草功能性状的影响[J]. 中国草地学报,2017,39(5):96-101.
- [3] Suying L, Peter H. V, Shihai L, *et al.* Spatial analysis of the driving factors of grassland degradation under conditions of climate change and intensive use in Inner Mongolia, China [J]. *Regional Environmental Change*, 2012, 12(3):461-474.
- [4] 赵娜,赵新全,赵亮,等. 植物功能性状对放牧干扰的响应[J]. 生态学杂志,2016,35(7):1916-1926.
- [5] 陈莹婷,许振柱. 植物叶经济谱的研究进展[J]. 植物生态学报,2014,38(10):1135-1153.
- [6] Corner E J H. The durian theory or the origin of the modern tree[J]. *Annals of Botany*, 1949, 13(4):367-414.
- [7] 章建红,史青茹,许洛山,等. 浙江天童木本植物 Corner 法则的检验:个体密度的影响[J]. 植物生态学报,2014,38(7):655-664.
- [8] Sun S C, Jin D M, Shi P L. The leaf size-twig size spectrum of temperate woody species along an altitudinal gradient: an invariant allometric scaling relationship [J]. *Annals of Botany*, 2006, 97(1):97-107.
- [9] 许月,杨晓东,谢一鸣,等. 浙江天童木本植物小枝的“大小-数量”权衡[J]. 植物生态学报,2012,36(12):1268-1276.
- [10] 潘琰,龚吉蕊,宝音陶格涛,等. 季节放牧下内蒙古温带草原羊草根茎叶功能性状的权衡[J]. 植物学报,2017,52(3):307-321.
- [11] 张铜会,杨甲定,赵哈林. 科尔沁沙质草地禾本科植物主要功能类型对连续放牧的反应[J]. 草业学报,2004,13(1):89-93.
- [12] 蒙旭辉,李向林,辛晓平,等. 不同放牧强度下羊草草甸草原群落特征及多样性分析[J]. 草地学报,2009,17(2):239-24.
- [13] 侯路路,闫瑞瑞,张宇,等. 放牧强度对草甸草原羊草功能性状的影响[J]. 中国农业科学,2020,53(13):2562-2572.
- [14] Milchunas G. Plant community dynamics in shortgrass steppe with grazing relaxation and imposition by large and small herbivores [J]. *Israel Journal of Ecology & Evolution*, 2011, 57(1-2):23-41.
- [15] 冯斌,杨晓霞,董全民,等. 高寒草地主要物种对放牧方式的响应[J]. 草业科学,2021,38(3):531-543.
- [16] O'Neill K. M, Olson B. E, Wallander R, *et al.* Effects of Livestock Grazing on Grasshopper Abundance on a Native Rangeland in Montana [J]. *Environmental Entomology*, 2010, 39(3):775-786.
- [17] 张娜,秦艳,金轲,等. 放牧对典型草原群落特征及土壤物理性状的影响[J]. 中国草地学报,2020,42(4):91-100.
- [18] 高欢欢,曾凡江,鲁艳,等. 不同干扰方式对疏叶骆驼刺生长及生理特征的影响[J]. 草业学报,2015,24(2):202-207.
- [19] 汪诗平,王艳芬,陈佐忠. 放牧生态系统管理[M]. 北京:科学出版社,2003:113-132.
- [20] Wumei X, Kyle W T, Jie L. Strong intraspecific trait variation in a tropical dominant tree species along an elevational gradient [J]. *Plant Diversity*, 2020, 42(1):1-6.
- [21] Nussey D H, Postma E, Gienapp P, *et al.* Selection on heritable phenotypic plasticity in a wild bird population [J]. *Science*, 2005, 310(5746):304-306.
- [22] Suzuki, Ryo O, Suzuki, *et al.* Facilitative and competitive effects of a large species with defensive traits on a grazing-adapted, small species in a long-term deer grazing habitat [J]. *Plant Ecology*, 2011, 212(3):343-351.
- [23] Westoby M. A leaf-height-seed (LHS) plant ecology strategy scheme [J]. *Plant and Soil*, 1998, 199(2):213-227.
- [24] 罗琦,刘慧,吴桂林,等. 基于功能性状评价5种植物对热带珊瑚岛环境的适应性[J]. 生态学报,2018,38(4):1256-1263.
- [25] Zheng S X, Ren H Y, Lan Z C, *et al.* Effects of grazing on leaf traits and ecosystem functioning in Inner Mongolia grasslands: scaling from species to community [J]. *Biogeosciences*, 2010, 7(3):1117-1132.
- [26] 安景源,李西良,丁勇,等. 不同放牧强度对糙隐子草功能性状的影响[J]. 中国草地学报,2021,43(1):50-57.
- [27] Hendrik P, Karl J N, Peter B Reich, *et al.* Biomass alloca-

- tion to leaves, stems and roots; meta-analyses of interspecific variation and environmental control [J]. *New Phytologist*, 2012, 193(1): 30–50.
- [28] 吴思雨, 宝音陶格涛, 许宏斌, 等. 放牧强度对内蒙古典型草原糙隐子草功能性状的影响 [J]. *应用生态学报*, 2021, 32(2): 392–398.
- [29] Hassiotou F, Renton M, Ludwig M, *et al.* Photosynthesis at an extreme end of the leaf trait spectrum: how does it relate to high leaf dry mass per area and associated structural parameters? [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2010, 61(11): 3015–3028.

Response of functional traits of *Leymus chinensis* to different grazing intensities in temperate meadow grassland

CHEN Yu¹, YANG Chen-chen¹, CHAO Luo-meng^{1,2*}, ZHOU Yan-lin^{1,2},
HU Gejiletu^{1,2}, WANG Chao-ran¹, JIA Ming¹

(1. College of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot 010010, China; 2. Key Laboratory of Plateau Ecology and Resource Utilization, Ministry of Education, Hohhot 010021, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the response mechanism and correlation of stem and leaf characters of *Leymus chinensis* in temperate meadow grassland of Xilin Gol League under the disturbance of sheep grazing. [Method] Four grazing intensities (no grazing, light grazing, moderate grazing and heavy grazing) were set up to measure the individual growth characteristics of *Leymus chinensis* in the temperate meadow grassland of Xilin Gol League. The responses of stems and leaves of *Leymus chinensis* to different grazing intensities were quantitatively analyzed, and the relationships, changes and influencing factors were studied. [Result] 1) The important values of *Leymus chinensis* decreased with increasing grazing intensity. The plants appeared to be dwarfed; the plant height, single plant weight, leaf number, leaf width and total leaf area decreased. Aboveground biomass of *Leymus chinensis* was significantly and positively correlated with plant height, stem dry weight, leaf dry weight and total leaf area but was not significantly correlated with leaf number. Light and moderate grazing exerted a positive effect on *Leymus chinensis* leaf growth, while heavy grazing had an inhibiting effect on leaf growth. 2) Light grazing increased the specific leaf area of *Leymus chinensis*. Moderate grazing had little difference with no grazing, but heavy grazing significantly reduced the specific leaf area. [Conclusion] Corner's Law was also applicable to grassland plants. Leaf traits were more sensitive under light and moderate grazing, and compensation phenomenon occurred, while individual growth characteristics were more sensitive under heavy grazing.

Key words: Temperate meadow grassland; grazing intensity; *Leymus chinensis*; stem-leaf relationship; Corner's rules