

DOI: 10.11686/cyxb2024129

http://cyxb.magtech.com.cn

吕娜, 高吉喜, 李政海, 等. 植物生长中期施肥对草甸草原群落特征与物种多样性的影响. 草业学报, 2025, 34(2): 109—122.

LYU Na, GAO Ji-xi, LI Zheng-hai, *et al.* Effects of fertilizer application during mid-growing season on vegetation community biomass and species diversity in meadow grasslands. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(2): 109—122.

植物生长中期施肥对草甸草原群落特征与物种多样性的影响

吕娜¹, 高吉喜^{1*}, 李政海², 尤春赫¹, 刘晓曼¹, 张彪³, 莫宇^{2,4}, 朱萨宁⁵, 彭阳¹, 杨雪⁶

(1. 生态环境部卫星环境应用中心, 北京 100094; 2. 大连民族大学环境与资源学院, 辽宁 大连 116600; 3. 包头师范学院生态环境学院, 内蒙古 包头 014030; 4. 内蒙古大学生态与环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010021; 5. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 6. 北京林业大学草业与草原学院, 北京 100083)

摘要:适当营养添加是提高草地生产力和稳定草原群落结构的重要手段,但不同养分添加量对大尺度草原群落的影响尚不清晰。在总面积为 182673 m² 的呼伦贝尔轻度退化天然刈割草地上开展施肥试验,以尿素颗粒、过磷酸钙颗粒、硫酸钾颗粒为 N、P、K 元素添加原料,共设置了 3 个养分添加处理:A 处理(2.3 g·m⁻² N、1.2 g·m⁻² P、0.75 g·m⁻² K),B 处理(4.6 g·m⁻² N、2.4 g·m⁻² P、1.5 g·m⁻² K),C 处理(6.9 g·m⁻² N、3.6 g·m⁻² P、2.3 g·m⁻² K)和 1 个对照处理;于植物生长中期的 2022 年 7 月中旬和 8 月初进行两次施肥,对比施肥对草地群落特征的影响。结果表明:各处理对草地生产力与物种多样性无协同影响,A 处理未显著影响群落生物量,但显著提高了群落丰富度指数;B 和 C 处理显著提高了群落生物量,由 CK 的 201.73 g·m⁻² 提高到 B 和 C 处理的 319.19 和 328.52 g·m⁻²,但未显著影响群落物种多样性。B 和 C 处理显著提高了优势种和多年生丛生禾草的生物量,B 处理还显著提高了多年生杂类草的生物量。B 和 C 处理群落生物量的提高是群落物种高度与密度共同作用的结果。A、B 和 C 处理均显著提升了群落 C、N、P 含量,且与群落生物量的提升呈显著正相关。施肥缓解了养分限制因子对植物生长的影响,通过提高群落中主要物种的生物量来提升群落生物量。

关键词:呼伦贝尔草原;物种多样性;草地生产力;化学计量比;植物功能群;群落成员型

Effects of fertilizer application during mid-growing season on vegetation community biomass and species diversity in meadow grasslands

LYU Na¹, GAO Ji-xi^{1*}, LI Zheng-hai², YOU Chun-he¹, LIU Xiao-man¹, ZHANG Biao³, MO Yu^{2,4}, ZHU Sa-ning⁵, PENG Yang¹, YANG Xue⁶

1. Ministry of Ecology and Environment Center for Satellite Application on Ecology and Environment, Beijing 100094, China; 2. College of Environment and Bioresources, Dalian Minzu University, Dalian 116600, China; 3. College of Ecology and Environment, Baotou Teacher's College, Baotou 014030, China; 4. School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot 010021, China; 5. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 6. School of Grassland Science, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Appropriate nutrient addition can improve grassland productivity and stability, but the effects of adding different amounts of nutrients on large-scale grassland communities are unclear. In this study, fertilization

收稿日期: 2024-04-18; 改回日期: 2024-06-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF1303403)资助。

作者简介: 吕娜(1991—), 女, 辽宁鞍山人, 硕士。E-mail: 601273924@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: gjx@nies.org

experiments were carried out in a field experiment on mildly degraded natural mowed grassland in Hulunbuir with a total area of 182673 m². Urea granules, calcium superphosphate granules, and potassium sulfate granules were used to supply nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K), respectively. Three nutrient addition treatments (A, B, C) and a control (CK) were established. The application rates of N, P₂O₅, and K₂O were 2.3, 1.2, and 0.75 g·m⁻², respectively, in treatment A; 4.6, 2.4, and 1.5 g·m⁻², respectively, in treatment B; and 6.9, 3.6, and 2.3 g·m⁻², respectively, in treatment C. No fertilizer was applied to the CK. The fertilizers were applied twice, once in mid-July and once in early August 2022 in the middle of the growing season. We compared the effects of these fertilization treatments on the characteristics of grassland communities. The results showed no synergistic effect of the treatments on the productivity and species diversity of the grassland. Treatment A did not significantly affect the community biomass, but significantly increased the community richness index. The community biomass was 201.73 g·m⁻² in CK, and was higher in treatment B (319.19 g·m⁻²) and treatment C (328.52 g·m⁻²), although the community species diversity did not differ significantly between CK and treatments B and C. Treatments B and C significantly increased the biomass of dominant species and perennial bunch grasses. Treatment B significantly increased the biomass of perennial forbs. The increase in community biomass in treatments B and C was associated with increases in community species height and density. Treatments A, B, and C significantly enhanced the carbon, N, and P contents in the community. The contents of carbon, N, and P in the communities in treatments A, B, and C were all significantly and positively correlated with community biomass. In conclusion, fertilization mitigates the effects of nutrient-limiting factors on plant growth and enhances community biomass by increasing the biomass of key species in the community.

Key words: Hulunbuir grassland; biodiversity; grassland productivity; stoichiometric ratio; plant functional group; community members

草地作为重要的陆地生态系统,承担着防风固沙、保持水土、涵养水源、调节气候、维护生物多样性等生态功能。从国家发展以及对草地资源刚性需求的新视角不难发现,草地生态系统在国家发展中还具有重要的经济价值和社会价值。随着居民膳食结构改变,草地资源在促进畜牧业发展、保障食物供需平衡、提高当地人们生活水平等方面的重要作用日益凸显。草地生态系统的生态功能、经济价值和社会价值实际都是国家安全战略格局重要空间载体^[1]。呼伦贝尔草原作为我国最大的草原之一,是我国北方重要的生态屏障,是重要的畜牧业养殖基地。但是,不合理利用已导致部分草地出现了不同程度的退化、沙化,为我国北方安全屏障的稳固性带来了风险,退化沙化草地修复与抑制迫在眉睫。

退化草地修复目标主要有两个方向,一是提升草地覆盖度和生产力,不考虑草地群落结构的合理性,主要应用在人工草地;二是在提高草地生产力的同时兼顾群落结构的合理性,即不违背其自然演替规律;大量研究表明,植物群落物种多样性对于草地生态系统功能起着重要作用,并且与生态系统稳定性、生产力和养分动态之间存在密切关系^[2-3],植物群落多样性减少将对草地生态系统功能造成威胁^[4-6];呼伦贝尔草原作为重要的自然生态系统,其退化草地修复目标则是第二者。土壤养分是植物赖以生存的物质基础,是植物生存的重要环境条件之一^[7]。土壤养分含量的多少不仅影响植物个体的生长状况^[8],而且影响群落组成和生产力^[9]。有研究表明^[10],即使在物种丰富度保持不变的情况下,资源添加也可以通过改变群落的功能和分类组成来实质性地改变群落结构。Pittarello等^[11]长期研究结果显示,通过刈割和施肥相结合是实现生境保护目标的合适策略,并成功恢复了阿尔卑斯山退化山地草地。合理施肥作为提高草地生产力和促进草地恢复的有效改良措施,已经被应用于欧洲^[12]、澳大利亚和北美^[13-14]等地的半干旱草地中。在我国内蒙古草原和青藏高原,施肥也被广泛应用于退化草地的改良与恢复^[4]。群落结构和物种组成一定程度上表征了草地的退化程度^[15-16],因此,退化草地施肥效果可通过观测其群

落结构和物种组成变化来判断。不同施肥量、施肥比例和施肥年限对植物个体、物种组成、群落结构和生物多样性等的影响极为复杂。代景忠等^[17]在呼伦贝尔草甸草原割草场的施肥试验结果表明,适量养分添加可以增加建群种羊草(*Leymus chinensis*)种群密度,但存在阈值,过量施肥导致羊草种群密度降低,部分优势种消失。在以羊草为建群种的草甸草原进行氮磷混合施肥,施肥初期增加了优势种细叶白头翁(*Pulsatilla turczaninowii*)种群高度,随着施肥年限和施肥量增加,细叶白头翁和糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)逐渐消失^[18]。有学者认为,植物的化学计量学特征能够揭示生态系统发展过程中在元素方面的适应性响应,判断植物汲取营养元素的情况,以及有机物的转化效率等^[19];银晓瑞等^[20]分析发现,恢复11和24年的两个群落物种组成已基本相同,而其化学计量比也已非常接近,说明群落中优势种的化学计量学特征对优势种更替以及群落演替方向均有一定的指示作用^[21]。

现有的相关研究结论多为植物生长初期施肥的结果,本试验在植物生长中期7月上旬和8月初分两次施肥,开展基于群落和物种组成结构(功能群、不同群落成员型)的地上生物量、密度、高度、植物化学计量比和物种多样性等群落特征对养分添加响应以及各指标间相互关系的研究,对于丰富植物群落稳定性相关理论,指导草地改良与恢复,促进草原生物多样性保护和草地资源利用与管理具有重要指导和应用价值。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于呼伦贝尔大草原腹地,陈巴尔虎旗狼井嘎查南部(49°34'42" N, 118°55'49" E)(图1)。该区域属于温带大陆性气候,半干旱区,四季分明,冬季寒冷干燥,夏季炎热,降水集中。海拔650~700 m,年平均温度0℃左右,无霜期85~155 d,年降水量250~350 mm,降水多集中在7—8月。试验区属草甸草原类型,根据现场观察以及监测结果,羊草为建群种,羊草与糙隐子草为优势种,贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*)、羽茅(*Achnatherum sibiricum*)、裂叶蒿(*Artemisia tanacetifolia*)、麻花头(*Klasea centauroides*)、黄囊苔草(*Carex korshinskyi*)与双齿葱(*Allium bidentatum*)为亚优势种,伴有阿尔泰狗娃花(*Aster altaicus*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、展枝唐松草(*Thalictrum squarrosum*)、二裂委陵菜(*Sibbaldianthe bifurca*)、大穗花(*Pseudolysimachion dauricum*)、柔毛蒿(*Artemisia pubescens*)、细叶鸦葱(*Takhtajaniantha pusilla*)和菊叶委陵菜(*Potentilla tanacetifolia*)等杂类草。该草场已连续打草超过20年,由于长年割草已出现轻度退化,植被覆盖度为50%~80%,植物生长季较短,主要集中在5—8月中旬,每年8月中下旬为集中割草季节。

1.2 试验设计与方法

由图2所示,试验区设置了3个大样区,为A、B和C处理,面积分别为55760、56453.33、54146.67 m²;其间设置3个宽度为20 m的“T”字形区域作为对照(CK),面积为16313.33 m²。每个处理样区设置同一养分添加量,其中,A处理为2.3 g·m⁻² N、1.2 g·m⁻² P、0.75 g·m⁻² K,B处理为4.6 g·m⁻² N、2.4 g·m⁻² P、1.5 g·m⁻² K,C处理为6.9 g·m⁻² N、3.6 g·m⁻² P、2.3 g·m⁻² K。每个处理内设置8个1 m×1 m样方,作为重复处理。采用人(手持终端)—无人机—电脑(ArcGIS软件)交互模式获取试验区边界并设置采样点(图2)。利用植保无人机添加养分。本试验添加的N、P、K元素选取的肥料分别为尿素颗粒、过磷酸钙颗粒、硫酸钾颗粒,施肥选择在下雨前一天或者下雨期间以颗粒状进行施肥。分别在2022年7月上旬、8月初进行两次添加作业,每次添加量为设计总量的50%。

1.3 样品采集和数据处理

2022年8月下旬,在前期设置的样方内进行样品采集与测定,用直尺分种测量不同物种的高度(height, H),每个物种测1~3个植株,取平均值;齐地面刈割植物地上部分并分种装入指定信封内,分种记录植株数量,即为植物密度(density, D)。将采集样品带回实验室放入烘箱内,65℃烘干至恒重,后用精度0.1 g天平称重,即为植物地上生物量(biomass, B)。

在样方采集数据的基础上统计群落指标,群落生物量为样方内所有植物累计生物量,群落高度为样方内所有植物高度平均值,植物密度为样方内所有物种累计密度。功能群与不同群落成员型各指标计算方法与群落一致。

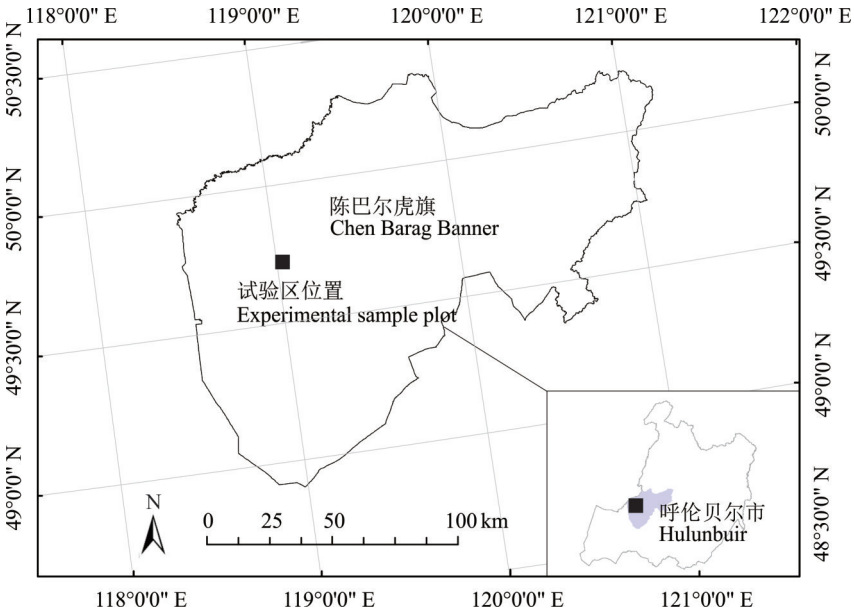


图 1 试验区地理位置

Fig. 1 Spatial location of the experimental area

基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2019)3333 号标准地图制作,底图边界无修改。Based on the standard map service website GS(2019)3333 of the Ministry of Natural Resources, the boundary of the base map is not modified.

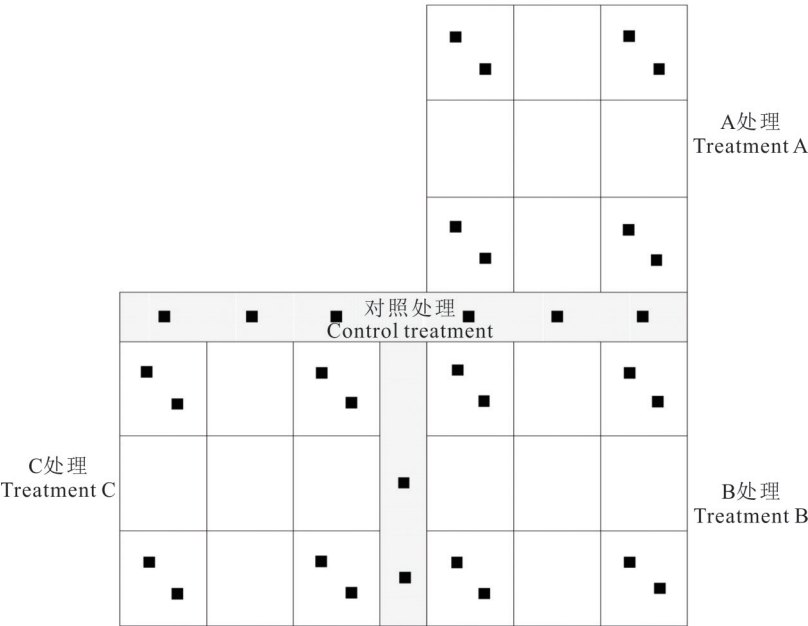


图 2 试验区样地划分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the division of sample plots in the experimental area

■为样方布置位置,边长为 1 m。■ is the location of the quadrat, and the side length is one meter.

植物物种重要值(important values, IV)、多样性指数(Shannon, H)、物种丰富度指数(Margalef, Ma)、优势度指数(Simpson, C)和均匀度指数(Pielou, E)计算公式如下:

物种相对重要值:

$$P_i = (A_r + B_r + H_r) / 3 \tag{1}$$

$$\text{相对密度}(A_r, \%) = \text{某一种的个体数} / \text{全部种的个体数之和} \times 100 \tag{2}$$

$$\text{相对生物量}(B_r, \%) = \text{某一种的生物量} / \text{全部种的生物量之和} \times 100 \tag{3}$$

$$\text{相对高度}(H_r, \%) = \text{某种植物的平均高度} / \text{所有植物种的平均高度之和} \times 100 \quad (4)$$

Shannon 多样性指数:

$$H = 1 - \sum_{i=1}^s (P_i \times \ln P_i) \quad (5)$$

Margalef 物种丰富度指数:

$$M_a = (S - 1) / \ln N \quad (6)$$

Simpson 优势度指数:

$$C = 1 - \sum_{i=1}^s P_i^2 \quad (7)$$

均匀度指数:

$$E = H / \ln S \quad (8)$$

式中: S 为草原群落多样性调查的总种数; N 为每个样方内所观察到植物的个体数; P_i 为第 i 个物种在全体物种中的相对重要值。

1.4 群落成员型与功能群划分

1) 群落成员型划分。试验区共采集到 64 种植物, 参照郭倩^[22]的方法, 以物种重要值 30%、60%、70%、95% 为分级标准, 确定群落优势种(dominant species, DS)、亚优势种(subdominant species, SDS)、主要伴生种(main companion species, MCS)、次要伴生种(secondary companion species, SCS)、偶见种(occasionally species, OS)等 5 个群落成员型。并根据经验确定糙隐子草、冷蒿、银灰旋花(*Convolvulus ammannii*)、多根葱(*Allium polyrhizum*)、星毛委陵菜(*Potentilla acaulis*)、柄状薹草(*Carex pediformis*)等 6 个物种为试验区的退化指示种(indicator species, IS)(表 1)。

2) 功能群划分。参考白永飞等^[23]的植物功能群划分方式, 按照生活型将试验区内植物划分为 5 个植物功能群, 分别为多年生根茎禾草(perennial rhizome grass, PR)、多年生丛生禾草(perennial bunchgrass, PB)、多年生杂类草(perennial forbs, PF)、灌木或半灌木(shrub/semi-shrubs, SS)、1 年生或 2 年生植物(annuals/biennial plant, AB)(表 1)。

1.5 植物群落养分测定

采用凯氏定氮法, 利用全自动定氮仪(K1160, 山东海能科学仪器)测定植物全氮含量; 采用钼锑抗比色法, 利用石墨消解仪(SH220F, 山东海能科学仪器)和紫外可见分光光度计(YV-1800PC, 上海美普达仪器)测定植物全磷含量; 采用元素分析仪(vario MACRO cube, 德国)测定植物全碳含量^[20]。

1.6 统计分析

利用 Excel 进行数据初步处理, 采用 IBM SPSS Statistics 20 软件开展单因素 ANOVA 方差分析和双变量相关性分析, 采用 R 软件计算多样性指数, 采用 Graphpad prism 9 制图。分析不同养分添加量对退化的自然打草场的群落、不同群落成员型和植物功能群等 3 个尺度的植物地上生物量、密度、高度、重要值以及群落植物碳、氮、磷含量和化学计量比的影响。同时计算多样性指数(H)、物种丰富度指数(M_a)、优势度指数(C)和均匀度指数(E) 4 个群落多样性核算指标, 分析群落多样性指数变化情况。通过相关性分析, 探讨不同养分添加量对以上指标的影响机制。本研究关于生物量的统计均为地上生物量; 为描述方便, 以“生物量”代替“地上生物量”。

2 结果与分析

2.1 不同养分添加量对群落特征的影响

随着养分添加量的增加, 群落生物量随之提高(图 3)。CK、A、B 和 C 处理平均生物量分别为 201.73、221.21、319.19 和 328.52 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$; A、B 和 C 处理生物量分别比 CK 高 9.7%、58.2%、62.9%; 方差分析显示, B 和 C 处理生物量均极显著高于 CK ($P < 0.01$), 表明 B 和 C 处理都可显著提高群落生产力。CK、A、B 和 C 处理群落植物平均密度分别为 469、359、483 和 412 株 $\cdot \text{m}^{-2}$; CK、A、B 和 C 处理群落高度分别为 23.39、23.04、23.11 和 24.31 cm; 方差分析显示, A、B 和 C 处理的群落密度和高度与 CK 比较均无显著差异, 说明养分添加未对群落密度和高度产生显著影响。

表1 试验区植物名录以及其所属不同群落成员型和功能群

Table 1 The list of plants in the experimental area, as well as the action level and functional group of the community to which they belong

种名 Species	科 Family	群落成员型 Community members	植物功能群 Plant functional group
大穗花 <i>P. dauricum</i>	车前科 Plantaginaceae	次要伴生种 Secondary companion species	多年生杂类草 Perennial forbs
多枝柳穿鱼 <i>Linaria buriatica</i>	车前科 Plantaginaceae	次要伴生种 Secondary companion species	多年生杂类草 Perennial forbs
裂叶荆芥 <i>Schizonepeta tenuifolia</i>	唇形科 Labiatae	偶见种 Occasionally species	1年生或2年生植物 Annuals/biennial plant
乳浆大戟 <i>Euphorbia esula</i>	大戟科 Euphorbiaceae	次要伴生种 Secondary companion species	多年生杂类草 Perennial forbs
扁蓿豆 <i>Medicago ruthenica</i>	豆科 Leguminosae	次要伴生种 Secondary companion species	多年生杂类草 Perennial forbs
米口袋 <i>Gueldenstaedtia verna</i>	豆科 Leguminosae	偶见种 Occasionally species	多年生杂类草 Perennial forbs
山野豌豆 <i>Vicia amoena</i>	豆科 Leguminosae	偶见种 Occasionally species	多年生杂类草 Perennial forbs
小叶锦鸡儿 <i>Caragana microphylla</i>	豆科 Leguminosae	偶见种 Occasionally species	灌木或半灌木 Shrub/semi-shrubs
斜茎黄芪 <i>Astragalus laxmannii</i>	豆科 Leguminosae	次要伴生种 Secondary companion species	多年生杂类草 Perennial forbs
草木樨状黄芪 <i>Astragalus melilotoides</i>	豆科 Leguminosae	偶见种 Occasionally species	多年生杂类草 Perennial forbs
贝加尔针茅 <i>S. baicalensis</i>	禾本科 Gramineae	亚优势种 Subdominant species	多年生丛生禾草 Perennial bunchgrass
冰草 <i>Agropyron cristatum</i>	禾本科 Gramineae	次要伴生种 Secondary companion species	多年生丛生禾草 Perennial bunchgrass
糙隐子草 <i>C. squarrosa</i>	禾本科 Gramineae	优势种 Dominant species	多年生丛生禾草 Perennial bunchgrass
草地早熟禾 <i>Poa pratensis</i>	禾本科 Gramineae	主要伴生种 Main companion species	多年生根茎禾草 Perennial rhizome grass
洽草 <i>Koeleria macrantha</i>	禾本科 Gramineae	次要伴生种 Secondary companion species	多年生丛生禾草 Perennial bunchgrass
羊草 <i>L. chinensis</i>	禾本科 Gramineae	优势种 Dominant species	多年生根茎禾草 Perennial rhizome grass
异燕麦 <i>Helictochloa hookeri</i>	禾本科 Gramineae	偶见种 Occasionally species	多年生丛生禾草 Perennial bunchgrass
羽茅 <i>A. sibiricum</i>	禾本科 Gramineae	亚优势种 Subdominant species	多年生丛生禾草 Perennial bunchgrass
钝叶瓦松 <i>Hylotelephium malacophyllum</i>	景天科 Crassulaceae	偶见种 Occasionally species	1年生或2年生植物 Annuals/biennial plant
长柱沙参 <i>Adenophora stenanthina</i>	桔梗科 Campanulaceae	次要伴生种 Secondary companion species	多年生杂类草 Perennial forbs
阿尔泰狗娃花 <i>A. altaicus</i>	菊科 Compositae	主要伴生种 Main companion species	多年生杂类草 Perennial forbs
白莲蒿 <i>Artemisia stechmanniana</i>	菊科 Compositae	偶见种 Occasionally species	灌木或半灌木 Shrub/semi-shrubs
冷蒿 <i>A. frigida</i>	菊科 Compositae	主要伴生种 Main companion species	灌木或半灌木 Shrub/semi-shrubs
裂叶蒿 <i>A. tanacetifolia</i>	菊科 Compositae	亚优势种 Subdominant species	多年生杂类草 Perennial forbs
柳叶风毛菊 <i>Saussurea salicifolia</i>	菊科 Compositae	偶见种 Occasionally species	多年生杂类草 Perennial forbs
麻花头 <i>K. centauroides</i>	菊科 Compositae	亚优势种 Subdominant species	多年生杂类草 Perennial forbs
蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i>	菊科 Compositae	偶见种 Occasionally species	多年生杂类草 Perennial forbs
柔毛蒿 <i>A. pubescens</i>	菊科 Compositae	次要伴生种 Secondary companion species	1年生或2年生植物 Annuals/biennial plant
丝叶苦蕒菜 <i>Iceris chinensis</i> subsp. <i>versicolor</i>	菊科 Compositae	次要伴生种 Secondary companion species	多年生杂类草 Perennial forbs
细叶鸦葱 <i>T. pusilla</i>	菊科 Compositae	次要伴生种 Secondary companion species	多年生杂类草 Perennial forbs
细叶藜 <i>Chenopodium stenophyllum</i>	藜科 Compositae	偶见种 Occasionally species	1年生或2年生植物 Annuals/biennial plant
达乌里苳芭 <i>Cymbaria daurica</i>	列当科 Orobanchaceae	次要伴生种 Secondary companion species	多年生杂类草 Perennial forbs
黄花列当 <i>Orobanche pycnostachya</i>	列当科 Orobanchaceae	偶见种 Occasionally species	1年生或2年生植物 Annuals/biennial plant
列当 <i>Orobanche coerulescens</i>	列当科 Orobanchaceae	偶见种 Occasionally species	1年生或2年生植物 Annuals/biennial plant
鳞叶龙胆 <i>Gentiana squarrosa</i>	龙胆科 Gentianaceae	次要伴生种 Secondary companion species	1年生或2年生植物 Annuals/biennial plant
棉团铁线莲 <i>Clematis hexapetala</i>	毛茛科 Ranunculaceae	偶见种 Occasionally species	多年生杂类草 Perennial forbs
细叶白头翁 <i>P. turczaninovii</i>	毛茛科 Ranunculaceae	次要伴生种 Secondary companion species	多年生杂类草 Perennial forbs
展枝唐松草 <i>T. squarrosom</i>	毛茛科 Ranunculaceae	主要伴生种 Main companion species	多年生杂类草 Perennial forbs
蓬子菜 <i>Galium verum</i>	茜草科 Rubiaceae	次要伴生种 Secondary companion species	多年生杂类草 Perennial forbs
二裂委陵菜 <i>S. bifurca</i>	蔷薇科 Rosaceae	主要伴生种 Main companion species	多年生杂类草 Perennial forbs
伏毛山莓草 <i>Sibbaldia procumbens</i>	蔷薇科 Rosaceae	偶见种 Occasionally species	多年生杂类草 Perennial forbs
菊叶委陵菜 <i>P. tanacetifolia</i>	蔷薇科 Rosaceae	次要伴生种 Secondary companion species	多年生杂类草 Perennial forbs
绢毛山莓草 <i>Sibbaldia sericea</i>	蔷薇科 Rosaceae	次要伴生种 Secondary companion species	多年生杂类草 Perennial forbs
轮叶委陵菜 <i>Potentilla verticillaris</i>	蔷薇科 Rosaceae	偶见种 Occasionally species	多年生杂类草 Perennial forbs

续表

种名 Species	科 Family	群落成员型 Community members	植物功能群 Plant functional group
星毛委陵菜 <i>P. acaulis</i>	蔷薇科 Rosaceae	次要伴生种 Secondary companion species	多年生杂类草 Perennial forbs
红柴胡 <i>Bupleurum scorzonrifolium</i>	伞形科 Umbelliferae	次要伴生种 Secondary companion species	多年生杂类草 Perennial forbs
柄状薹草 <i>C. pediformis</i>	莎草科 Cyperaceae	偶见种 Occasionally species	多年生杂类草 Perennial forbs
寸草 <i>Carex duriuscula</i>	莎草科 Cyperaceae	次要伴生种 Secondary companion species	多年生杂类草 Perennial forbs
黄囊苔草 <i>C. korshinskyi</i>	莎草科 Cyperaceae	亚优势种 Subdominant species	多年生杂类草 Perennial forbs
独行菜 <i>Lepidium apetalum</i>	十字花科 Cruciferea	偶见种 Occasionally species	1 年生或 2 年生植物 Annuals/biennial plant
小花花旗杆 <i>Dontostemon micranthus</i>	十字花科 Cruciferea	偶见种 Occasionally species	1 年生或 2 年生植物 Annuals/biennial plant
多根葱 <i>A. polyrhizum</i>	石蒜科 Amaryllidaceae	偶见种 Occasionally species	多年生杂类草 Perennial forbs
双齿葱 <i>A. bidentatum</i>	石蒜科 Amaryllidaceae	亚优势种 Subdominant species	多年生杂类草 Perennial forbs
山韭 <i>Allium senescens</i>	石蒜科 Amaryllidaceae	偶见种 Occasionally species	多年生杂类草 Perennial forbs
细叶韭 <i>Allium tenuissimum</i>	石蒜科 Amaryllidaceae	次要伴生种 Secondary companion species	多年生杂类草 Perennial forbs
野韭 <i>Allium ramosum</i>	石蒜科 Amaryllidaceae	次要伴生种 Secondary companion species	多年生杂类草 Perennial forbs
早麦瓶草 <i>Silene jenseensis</i>	石竹科 Caryophliaceae	偶见种 Occasionally species	多年生杂类草 Perennial forbs
石竹 <i>Dianthus chinensis</i>	石竹科 Caryophliaceae	偶见种 Occasionally species	多年生杂类草 Perennial forbs
刺藜 <i>Teloxys aristata</i>	苋科 Amaranthaceae	次要伴生种 Secondary companion species	1 年生或 2 年生植物 Annuals/biennial plant
藜 <i>Chenopodium album</i>	苋科 Amaranthaceae	次要伴生种 Secondary companion species	1 年生或 2 年生植物 Annuals/biennial plant
银灰旋花 <i>C. ammannii</i>	旋花科 Convolvulaceae	偶见种 Occasionally species	多年生杂类草 Perennial forbs
粗根鸢尾 <i>Iris tigridia</i>	鸢尾科 Iridaceae	偶见种 Occasionally species	多年生杂类草 Perennial forbs
囊花鸢尾 <i>Iris ventricosa</i>	鸢尾科 Iridaceae	次要伴生种 Secondary companion species	多年生杂类草 Perennial forbs
野鸢尾 <i>Iris dichotoma</i>	鸢尾科 Iridaceae	偶见种 Occasionally species	多年生杂类草 Perennial forbs

2.2 不同养分添加量对群落碳、氮、磷含量的影响

随着养分添加量的增加,群落氮、磷含量随之增加(图 4)。其中,A、B 和 C 处理的群落氮含量均显著高于 CK ($P<0.05$),分别高 16.1%、42.6%、56.3%。A、B 和 C 处理的群落磷含量均显著高于 CK ($P<0.05$),分别高 16.9%、30.3%、36.0%。C 处理的群落碳含量较 CK 显著增加 1.9% ($P<0.05$)。综合来看,C 处理对群落碳、氮、磷含量的提升效果最好。

2.3 不同养分添加量对群落植物化学计量比的影响

随着养分添加量的增加,C/N、C/P 随之降低(图 5)。A、B 和 C 处理的群落植物 C/N 和 C/P 均显著低于 CK ($P<0.05$)。C 处理群落植物 N/P 显著高于 CK ($P<0.05$)。

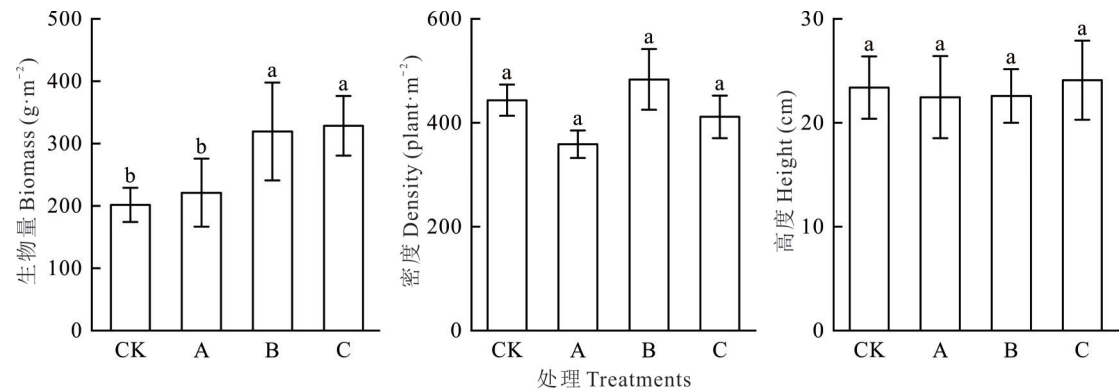


图 3 不同处理群落生物量、植物密度和群落高度

Fig. 3 Community biomass, plant density and community height under different treatments

CK 表示对照处理,A 代表 A 处理,B 代表 B 处理,C 代表 C 处理;不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。下同。CK represents the control treatment, A represents the A treatment, B represents the B treatment, and C represents the C treatment; Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments. The same below.

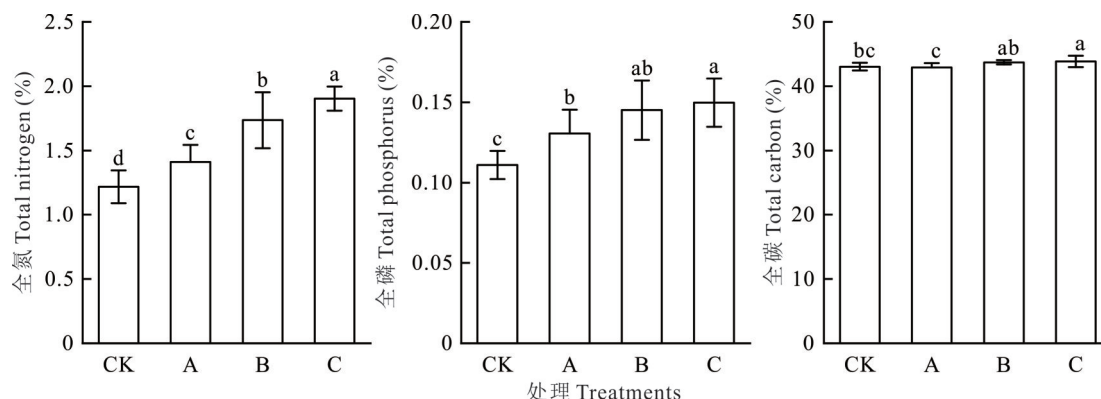


图4 不同处理群落植物养分含量

Fig. 4 The nutrient content in community plants under different treatments

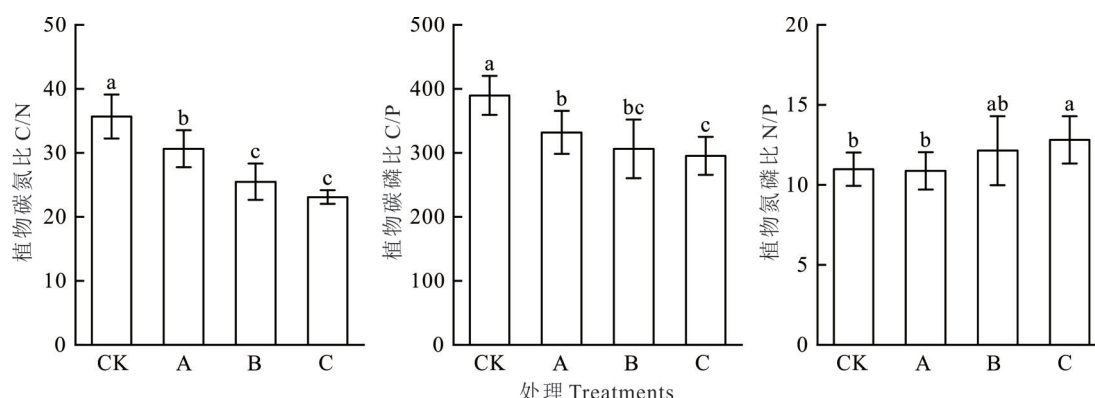


图5 不同处理群落植物养分化学计量比

Fig. 5 The nutrient stoichiometry in community plants under different treatments

2.4 不同养分添加量对不同群落成员型植物的影响

从生物量来看,A处理显著提高了主要伴生种的生物量($P<0.05$),由CK的 $21.94\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 提高到 $43.45\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,提高了98%。B和C处理显著提高了优势种的生物量($P<0.05$),由CK的 $82.2\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 分别提高到了B和C处理的 126.4 和 $141.1\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,还显著提高了退化指示种的生物量($P<0.05$),由 $67.50\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 分别提高到了 130.90 和 $205.67\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。从密度来看,A处理显著降低了次要伴生种的密度($P<0.05$),由 $101.13\text{ 株}\cdot\text{m}^{-2}$ 降低到了 $54.5\text{ 株}\cdot\text{m}^{-2}$ 。从高度来看,A处理显著提高了退化指示种的高度($P<0.05$),由 8.13 cm 提高到 11.66 cm 。从重要值来看,A处理显著降低了退化指示种群落的重要值($P<0.05$),由 40.7% 降低到了 25.5% ,显著提高了主要伴生种的重要值($P<0.05$),由 10.0% 提高到了 16.1% (图6)。

2.5 不同养分添加量对不同植物功能群的影响

B和C处理显著提高了多年生丛生禾草的生物量($P<0.05$),由CK的 $70.04\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 分别提高到 114.17 和 $136.95\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。B处理显著提高了多年生杂类草的生物量($P<0.05$),由 $74.21\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 提高到了 $136.03\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。A处理显著降低了多年生丛生禾草的密度($P<0.05$),由 $122.75\text{ 株}\cdot\text{m}^{-2}$ 降低到了 $72.13\text{ 株}\cdot\text{m}^{-2}$ 。A处理显著降低了多年生丛生禾草的重要值($P<0.05$),由 28.93% 降低到了 20.78% ;A处理极显著提高了多年生杂类草的重要值($P<0.01$),由 41.47% 提高到了 52.28% (表2)。

2.6 不同养分添加量对群落多样性的影响

A、B和C处理的群落物种丰富度指数分别比CK增加了 24.0% 、 1.6% 和 5.6% ,其中,A处理显著高于CK($P<0.05$)。3个处理的辛普森多样性指数、香农多样性指数、均匀度指数较CK均无显著差异。说明B和C处理在提高群落生物量的同时不会降低群落物种丰富度(图7)。

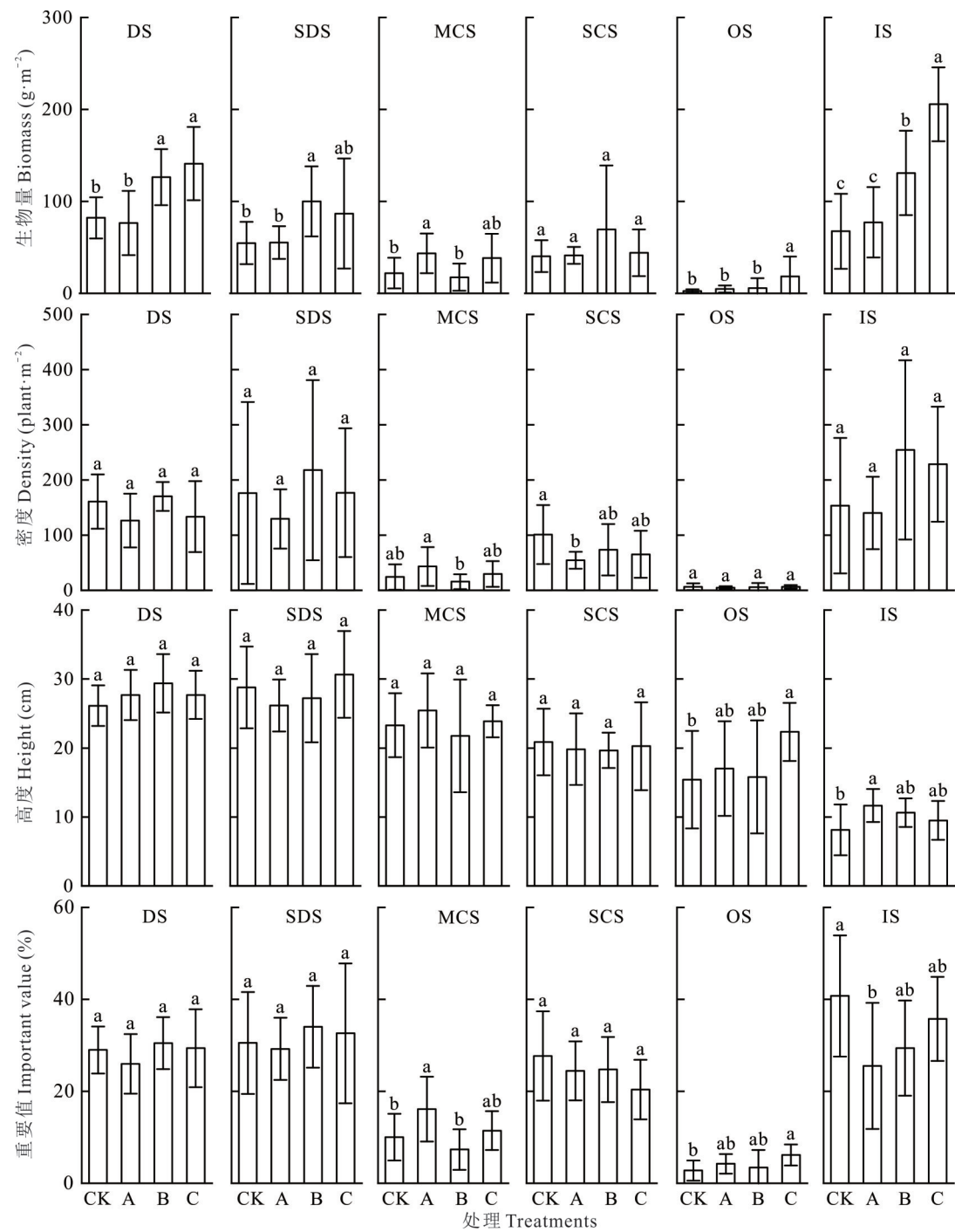


图6 不同群落成员型生物量、密度、高度和重要值
Fig. 6 The biomass, density, height, and importance values of different community members

DS:表示优势种 represents dominant species; SDS:表示亚优势种 represents subdominant species; MCS:表示主要伴生种 represents main companion species; SCS:表示次要伴生种 represents secondary companion species; OS:表示偶见种 represents occasionally species; IS:表示退化指示种 represents indicator species;下同 The same below.

2.7 相关性分析

由图8可知,群落生物量与群落、优势种和亚优势种的高度呈显著正相关($P<0.05$);群落高度与多年生根茎禾草、多年生丛生禾草、多年生杂类草以及除优势种以外的其他群落成员型的高度均呈显著正相关($P<0.05$)。

群落生物量与优势种、亚优势种、多年生丛生禾草和多年生杂类草的生物量均呈显著正相关($P<0.05$)。优势种、亚优势种的生物量与其各自的密度呈显著正相关($P<0.05$);多年生杂类草的生物量与其自身的密度和高

表 2 不同处理功能群生物量、密度、群落高度和重要值

Table 2 The biomass, density, community height, and importance value for different treatments functional groups

项目 Items	处理 Treatments	多年生根茎禾草 Perennial rhizomatous grass	多年生丛生禾草 Perennial bunchgrass	多年生杂类草 Perennial forbs	灌木或半灌木 Shrub/semi-shrub	1年生或2年生植物 Annuals/biennial plant
生物量 Biomass (g·m ⁻²)	CK	45.77±21.12a	70.04±29.64b	74.21±25.32b	5.91±8.40a	9.16±7.60a
	A	43.20±26.68a	59.72±29.68b	103.67±24.77ab	10.09±6.63a	4.53±4.89a
	B	55.73±21.91a	114.17±49.25a	136.03±87.83a	7.78±7.19a	7.43±7.97a
	C	38.28±30.88a	136.95±50.97a	130.71±57.73ab	5.99±6.67a	17.34±23.06a
密度 Density (plant·m ⁻²)	CK	111.63±56.48a	122.75±39.06a	178.25±94.47a	2.40±1.52a	29.00±24.24a
	A	84.25±46.14a	72.13±17.22b	184.63±42.59a	2.75±2.61a	14.88±9.89a
	B	103.88±38.88a	97.25±37.25ab	247.25±167.91a	2.67±1.63a	33.00±32.70a
	C	73.38±63.91a	87.38±23.60ab	224.00±107.12a	3.43±2.23a	23.75±13.58a
高度 Height (cm)	CK	75.00±19.56ab	100.63±41.32ab	248.75±87.46a	30.4±15.65a	37.14±26.56a
	A	80.13±11.52a	87.50±16.40b	311.63±92.28a	36.50±15.57a	33.38±25.39a
	B	58.13±24.93b	92.75±23.61b	271.63±62.53a	25.33±15.25a	33.00±27.49a
	C	57.25±21.74b	124.75±30.12a	269.38±93.87a	22.00±10.41a	51.75±27.97a
重要值 Important values (%)	CK	19.87±7.20a	28.93±2.46a	41.47±2.26b	1.95±0.86b	5.59±1.95a
	A	18.76±2.08a	20.78±1.62b	52.28±2.66a	4.06±0.60a	4.12±0.78a
	B	18.01±2.45a	26.03±2.78ab	48.48±4.09ab	2.10±0.64b	5.38±1.62a
	C	13.02±2.44a	30.29±3.49a	47.67±3.95ab	2.08±0.56b	6.95±1.39a

同列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。Different letters in the same column mean significant difference at 0.05 level.

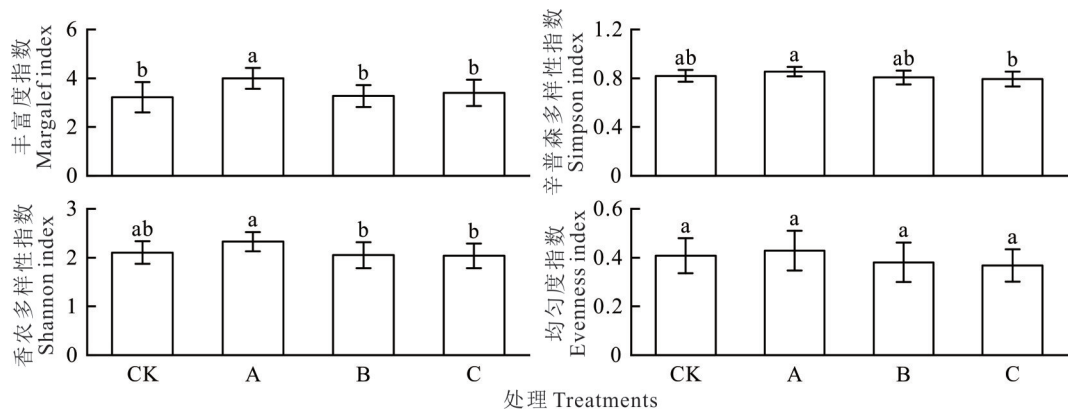


图 7 不同处理群落物种多样性指数

Fig. 7 Species diversity index in different treatments communities

度均呈显著正相关($P<0.05$)。

群落生物量与群落 C、N、P 元素和 N/P 呈显著正相关($P<0.05$), 优势种的生物量与群落 N、P 元素呈显著正相关($P<0.05$), 群落与优势种的生物量均与群落 C/N、C/P 呈显著负相关($P<0.05$)。亚优势种的生物量与群落 C、N 元素和 N/P 呈显著正相关($P<0.05$), 多年生丛生禾草的生物量与群落 C、N、P 元素呈显著正相关($P<0.05$), 多年生杂类草的生物量与群落 N 元素、N/P 呈显著正相关($P<0.05$), 以上 3 类物种生物量均与 C/N 呈显著负相关($P<0.05$)。

综合分析发现, B 和 C 处理下的优势种和多年生丛生禾草的生物量显著提高, 是群落生物量提高的主要原因; 不同群落成员型和功能群物种内部指标的相关关系是影响群落变化的间接因素; 在各处理下并未发生显著变

化的指标虽与群落生物量呈显著相关关系,但是只能得到其对提高群落生产力的贡献大于其他(与群落生物量无相关性)指标的结论。

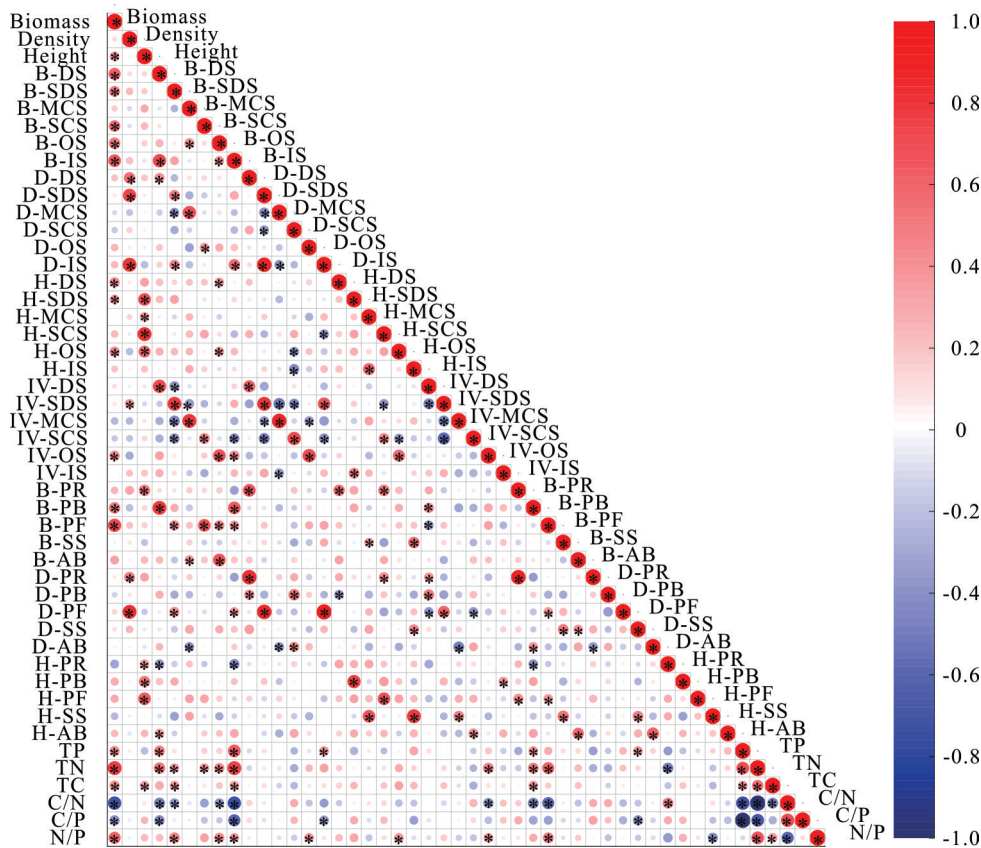


图 8 各监测指标的双变量相关性分析

Fig. 8 Bivariate correlation analysis of each monitoring indicator

B: 生物量 Biomass; D: 密度 Density; H: 高度 Height; IV: 重要值 Important value; PR: 多年生根茎禾草 Perennial rhizome grass; PB: 多年生丛生禾草 Perennial bunchgrass; PF: 多年生杂类草 Perennial forbs; SS: 灌木或半灌木 Shrub/semi-shrubs; AB: 1 年生或 2 年生植物 Annuals/biennial plant; TP: 全磷 Total P; TN: 全氮 Total N; TC: 全碳 Total C. *: 表示差异显著 Indicates significant differences at 0.05 level. *: $P \leq 0.05$

3 讨论

3.1 群落特征对养分添加的响应

不同植物种群在群落中占据一定的资源,植物群落生产力取决于植物种群对资源的利用,施肥可以有效增加土壤中资源的利用水平,从而降低物种对最小限制资源竞争的强度,促进植物生长^[23-24]。本试验的养分添加首先显著促进草地生产力恢复,符合草地修复第一阶段的反应^[22]。对群落结构和生态功能具有明显控制作用的优势种,其群落学地位未在短期施肥后发生显著变化也符合群落演替过程。本试验 B 和 C 处理显著提高了草地群落优势种的生物量,这与优势植物具有较大的密度基数和一定的生长高度优势相关^[25]。B 和 C 处理还显著提高了退化指示种的生物量,其原因主要是作为群落优势种糙隐子草的生物量极显著提高引起的。

不同功能群植物在生态系统中的生态位不同,对养分的响应也不同。郑佳华等^[26]在锡林浩特市毛登牧场开展的氮、磷和钾肥混施试验得到的结论显示,高度较高的多年生禾草处于有利的竞争位置,有更高的养分吸收效率,对养分添加更加敏感。而作为群落优势功能群的多年生丛生禾草、多年生杂类草,养分的添加首先影响这两类主要功能群,一旦这两个功能群的生物量和重要值提高,势必会占据更多的光资源,对低矮的植物造成负面影响^[27]。本试验相关性分析结果显示,多年生丛生禾草的生物量与群落生物量呈极显著正相关,也证明了这一结论,同时也说明植物生长季早期施肥与中期(雨季)施肥对其影响都是正向的。代景忠等^[17]在呼伦贝尔草场连续

两年开展的氮磷肥混施试验结果显示,同时施用氮肥和磷肥可以提高禾本科植物的重要值。李璠等^[27]在青藏高原开展的生长末期施肥对地上生物量影响的结果显示,施肥可以提高禾本科、杂类草和群落总生物量;本试验结果与之基本相同,A处理显著降低了多年生丛生禾草密度、重要值,对多年生根茎禾草并没有显著影响,B和C处理显著提高了多年生丛生禾草的生物量,B处理还显著提高了多年生杂类草的生物量。

整体分析发现,施肥主要通过提高群落中群落学作用较高的物种生物量来提升群落生物量,这些物种在施肥后占用更多资源,进而导致其他物种的密度和高度降低。群落的密度和高度则在此消彼长的变化过程中未发生显著提高或者减少。本试验各种处理中,优势种、亚优势种等主要群落成员型的重要值没有出现显著变化,而只有处于次要地位的主要伴生种和偶见种分别在A和C处理下重要值显著高于对照,这可能得益于群落资源限制缓解后,原来受到养分限制且处于从属地位的植物得以发展的结果。综合来看,针对不同的草地修复需求,3个处理各有优势,A处理在群落物种多样性提升应用方面具有积极促进作用;B处理在提升区域防风固沙生态系统服务功能的应用方面具有显著作用,因为其在提升群落生产力的同时,必然会提升群落植物覆盖度,从而提升群落防风固沙功能;C处理在提升群落生产力的同时还显著提升了禾本科生物量,一定程度上提升了草场质量,因此,C处理在饲草地综合质量提升的应用上将有良好的促进作用。

3.2 植物C、N、P元素含量和化学计量比对养分添加量的响应

本试验发现,A、B、C处理显著提高了群落N、P元素含量,C处理显著提升了C元素含量,群落C、N和P含量的增加与群落生物量呈显著正相关;代景忠^[28]在呼伦贝尔市开展的施肥(每年6月初施肥)和刈割试验结果发现,降水对植物吸收元素的影响很大,其中降水越充沛,植物对P元素的吸收越敏感,同时,养分添加会促进植物对P元素的利用,也可以提升固碳能力,且随着施肥浓度的增加元素含量随之增加,本试验结果与之一致。本试验选择在降水充沛的季节添加养分,也可以提高植被对元素的吸收效率,加上7—8月试验地阳光充沛、温度较高,在水热共同作用下,植被生长速率加快,可促进群落生物量的提高。有研究表明^[29],植物化学计量比可以反映植物的生长速率,其中,C/N显著降低代表着群落生长速率的提升,而植物C/P越低,其生长速率越高,本试验结果显示,随着养分添加量的增加,C/N、C/P显著降低,同时两者与群落生物量均呈负相关,与前两位研究者的结论相一致。也有研究认为N/P可以表征植物群落N、P元素限制情况^[30],本试验的B和C处理均提高了群落N/P,其中C处理显著增加了N/P,说明施肥降低了N元素限制,同时反映出了植物对P元素的需求量也将增加。

3.3 群落生物多样性对养分添加量的响应

很多研究结果表明,养分添加降低了群落物种多样性,刘学敏等^[31]在高寒草甸返青期(5月)开展的氮添加研究发现,施氮使植物群落均匀度降低,而且草地物种丰富度指数也随之降低。本试验A处理显著提高了群落物种丰富度指数,B和C处理也有小幅提高,3个处理的辛普森多样性指数、香农多样性指数和均匀度指数均有小幅度减小,但是与CK均无显著差异;本试验结果与之不同的可能原因有:1)本试验周期仅一年,还需要继续进行试验,探究养分积累对群落的影响;2)本试验按照经验值设计养分配比,养分添加量设置未达到极值,无法判断浓度继续增加后对群落植物多样性的影响;3)不同草地类型与物种组成对养分添加的响应也不同,同时土壤与植被本底状况也是影响结果的因素之一;4)本试验养分添加的时间为草地生长中期,该时期的降水、温度和养分充沛,土壤内植物种子基本全部发芽,养分添加有效促进了植物的生长,因此,植被生长中期添加养分可能是群落物种多样性稳定的原因之一;5)本试验是基于天然打草场的无人机喷洒试验,其位置在草原腹地,试验区面积182673 m²,其他影响因子均相同,与小面积控制试验有一定差异,本试验结果更接近于草地修复工程,更能够反映天然草地的实际施肥效果。但是,物种多样性并不是评价群落健康的唯一标准,针对草原不同类型、演替阶段及功能应该有不同的评价标准,草地修复与改良工作的开展需要对目标区域本底情况、干扰因素以及提高目标等进行充分分析,做出正确诊断,对症下药,才能获得更加有效的修复改良方案。

4 结论

本试验第一年度的雨季草甸草原施肥对群落植物多样性未产生负面影响。3个处理对草地群落具有不同的影响,其中A处理作为低施肥量对提升群落物种多样性有积极效果,作为中高施肥量的B和C处理显著提高了群

落生产力。施肥缓解了养分限制因子对植物生长的影响,通过提高群落中群落学作用较高物种的生物量来提升群落生物量。研究结果可为草原生物多样性保护与草地资源利用与管理提供科学依据。

参考文献 References:

- [1] Hao T X, Yang M, Yu G R. Coordinate the five-pool functions of grassland ecosystem and build a strong national ecological security barrier in China. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2023, 37(4): 603–612.
郝天象, 杨萌, 于贵瑞. 统筹草地生态系统五库功能构建国家生态安全屏障. *中国科学基金*, 2023, 37(4): 603–612.
- [2] Basso B, Dumont B, Cammarano D, *et al.* Environmental and economic benefits of variable rate nitrogen fertilization in a nitrate vulnerable zone. *Science of the Total Environment*, 2016, 545/546: 227–235.
- [3] Bennett L T, Judd T S, Adams M A, *et al.* Growth and nutrient content of perennial grasslands following burning in semiarid, sub-tropical Australia. *Plant Ecology*, 2003, 164(2): 185–199.
- [4] Zhang J Q, Li Q, Ren Z W, *et al.* Effects of nitrogen addition on species richness and relationship between species richness and aboveground productivity of alpine meadow of the Qinghai–Tibetan Plateau, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(10): 1125–1131.
张杰琦, 李奇, 任正炜, 等. 氮素添加对青藏高原高寒草甸植物群落物种丰富度及其与地上生产力关系的影响. *植物生态学报*, 2010, 34(10): 1125–1131.
- [5] Hautier Y, Seabloom E W, Borer E T, *et al.* Eutrophication weakens stabilizing effects of diversity in natural grasslands. *Nature*, 2014, 508(7497): 521–525.
- [6] Hector A, Schmid B, Beierkuhnlein C, *et al.* Plant diversity and productivity experiments in European grasslands. *Science*, 1999, 286(5422): 1123–1127.
- [7] He X D, Cong P F, Dong Z B, *et al.* Review on global ecological degradation in the last 30 years of 20th Century. *Journal of Desert Research*, 2007, 27(2): 283–289.
何兴东, 丛培芳, 董治宝, 等. 20世纪末30a里全球生态退化状况. *中国沙漠*, 2007, 27(2): 283–289.
- [8] Zhang N, Teng J L, He X D, *et al.* Response of *Oxytropis aciphylla* community to soil nutrient spatial heterogeneity. *Journal of Desert Research*, 2008, 28(4): 706–711.
张宁, 滕玖琳, 何兴东, 等. 猫头刺群落对土壤养分空间异质性的响应. *中国沙漠*, 2008, 28(4): 706–711.
- [9] Wang H L, Bi L D, Zhang B. Change in microbial biomass and its controlling factors in degraded soil after reforestation of *Pinus massoniana*. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(2): 313–320.
王会利, 毕利东, 张斌. 退化红壤马尾松恢复林地土壤微生物生物量变化及其控制因素研究. *土壤学报*, 2008, 45(2): 313–320.
- [10] Kimmel K, Dee L, Tilman D, *et al.* Chronic fertilization and irrigation gradually and increasingly restructure grassland communities. *Ecosphere*, 2019, 10(3): e02625.
- [11] Pittarello M, Gorlier A, Enri S R, *et al.* Combining fertilisation and mowing as an effective practice to control *Brachypodium rupestre* encroachment in an abandoned grassland of the Alps. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2024, 370: 109048.
- [12] Fay P A, Reichmann L G, Aspinwall M J, *et al.* A CO₂ concentration gradient facility for testing CO₂ enrichment and soil effects on grassland ecosystem function. *Journal of Visualized Experiments*, 2015(105): 53151.
- [13] Avolio M L, Koerner S E, Pierre K J, *et al.* Changes in plant community composition, not diversity, during a decade of nitrogen and phosphorus additions drive above-ground productivity in a tallgrass prairie. *Journal of Ecology*, 2014, 102(6): 1649–1660.
- [14] Rawnsley R P, Smith A P, Christie K M, *et al.* Current and future direction of nitrogen fertiliser use in Australian grazing systems. *Crop and Pasture Science*, 2019, 70: 1034–1043.
- [15] Yang X M, Yao T, Wang L D, *et al.* Community structure and plant diversity under different degrees of degraded grassland in Tianzhu, Gansu. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(6): 1290–1297.
杨晓玫, 姚拓, 王理德, 等. 天祝不同退化程度草地植物群落结构与物种多样性研究. *草地学报*, 2018, 26(6): 1290–1297.
- [16] Milauer P, Lep J. *Multivariate analysis of ecological data using CANOCO*. London: Cambridge University Press, 2004.
- [17] Dai J Z, Yan R R, Wei Z J, *et al.* Effects of fertilization on functional group species richness and important value in *Leymus chinensis* mowing meadow. *Journal of Desert Research*, 2017, 37(3): 453–461.

- 代景忠, 闫瑞瑞, 卫智军, 等. 施肥对羊草割草场功能群物种丰富度和重要值的影响. 中国沙漠, 2017, 37(3): 453—461.
- [18] Chen J S, Kong X L, Zhu R F, *et al.* Effects of cutting root and nitrogen application on soil physical and chemical properties of degraded *Leymus chinensis* grassland. Acta Agrestia Sinica, 2018, 26(5): 1104—1108.
- 陈积山, 孔晓蕾, 朱瑞芬, 等. 切根和施氮对退化羊草草地土壤理化性质的影响. 草地学报, 2018, 26(5): 1104—1108.
- [19] Sinsabaugh R L, Lauber C L, Weintraub M N, *et al.* Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale. Ecology Letters, 2008, 11(11): 1252—1264.
- [20] Yin X R, Liang C Z, Wang L X, *et al.* Ecological stoichiometry of plant nutrients at different restoration succession stages in typical steppe of Inner Mongolia, China. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(1): 39—47.
- 银晓瑞, 梁存柱, 王立新, 等. 内蒙古典型草原不同恢复演替阶段植物养分化学计量学. 植物生态学报, 2010, 34(1): 39—47.
- [21] Dan B, Giardina C. Why do tree species affect soils? The warp and woof of tree soil interactions. Biogeochemistry, 1998, 42(1): 89—106.
- [22] Guo Q. The species hierarchy classification and important value method improvement in grassland community. Lanzhou: Lanzhou University, 2017.
- 郭倩. 草地群落植物种等级划分及重要值方法改进. 兰州: 兰州大学, 2017.
- [23] Bai Y F, Zhang L X, Zhang Y, *et al.* Changes in plant functional composition along gradients of precipitation and temperature in the Xilin River Basin, Inner Mongolia. Chinese Journal of Plant Ecology, 2002, 26(3): 308—316.
- 白永飞, 张丽霞, 张焱, 等. 内蒙古锡林河流域草原群落植物功能群组成沿水热梯度变化的样带研究. 植物生态学报, 2002, 26(3): 308—316.
- [24] Du Q L. Sustainable development strategy of China's grass industry. Beijing: China Agriculture Press, 2006.
- 杜青林. 中国草业可持续发展战略. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- [25] Zhang Z T, Liu Q. Grassland resources and their development and utilization in key pastoral areas of China. Beijing: China Science and Technology Wood Publishing House, 1992.
- 章祖同, 刘起. 中国重点牧区草地资源及其开发利用. 北京: 中国科学技术出版社, 1992.
- [26] Zheng J H, Zhang F, Zhao T Q, *et al.* Effects of nitrogen, phosphorus and potassium combinations on aboveground biomass of *Stipa grandis* clipping pasture. Chinese Journal of Grassland, 2020, 42(5): 64—71.
- 郑佳华, 张峰, 赵天启, 等. 氮、磷、钾施配对大针茅割草地上生物量的影响. 中国草地学报, 2020, 42(5): 64—71.
- [27] Li F, Zhou G Y, Yang L C, *et al.* Effects of fertilizer at later growth stage on above-ground biomass in the alpine steppe of Tibetan Plateau. Acta Agrestia Sinica, 2014, 22(5): 998—1006.
- 李璠, 周国英, 杨路存, 等. 生长末期施肥对青藏高原高寒草原地上生物量的影响. 草地学报, 2014, 22(5): 998—1006.
- [28] Dai J Z. Effects of root-cutting and fertilization on vegetation and soil in mowing pasture of *Lymus chinensis* meadow steppe. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2016.
- 代景忠. 切根与施肥对羊草草甸草原割草场植被与土壤的影响. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.
- [29] Li R X, Liu Q F, Li D, *et al.* Ecological stoichiometry of degraded *Leymus chinensis* steppe in Xilin River Basin. Chinese Journal of Grassland, 2018, 40(2): 75—80.
- 李瑞新, 刘庆福, 李丹, 等. 锡林河流域退化羊草草原的生态化学计量学研究. 中国草地学报, 2018, 40(2): 75—80.
- [30] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N:P ratio: A new tool to detect the nature of nutrient limitation. Journal of Applied Ecology, 1996, 33(6): 1441—1450.
- [31] Liu X M, Luo J F, Deng D Z, *et al.* Effect of nitrogen addition on alpine grassland ecosystems degraded to different extents. Pratacultural Science, 2018, 35(12): 2773—2783.
- 刘学敏, 罗久富, 邓东周, 等. 氮添加对不同退化程度高寒草地生态系统的影响. 草业科学, 2018, 35(12): 2773—2783.