

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.02.003

引用格式:毕鑫,俞天琦,侍梦圆,等.放牧强度对羊草草甸草原植物群落组成及生态位的影响[J].草地学报,2026,34(2):403—414

BI Xin, YU Tian-qi, SHI Meng-yuan, et al. The Influences of Grazing Intensity on the Composition of Plant Communities and Ecological Niches in the *Leymus chinensis* Meadow Steppe[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(2):403—414

放牧强度对羊草草甸草原植物群落组成及生态位的影响

毕鑫¹, 俞天琦², 侍梦圆², 辛晓平², 张智涛¹, 闫瑞瑞^{2*}, 韩国栋^{1*}

(1. 内蒙古农业大学草业学院, 内蒙古 呼和浩特 010018; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘要:为探究羊草(*Leymus chinensis*)草甸草原不同放牧强度下植物群落物种多样性与生态位的变化与联结,为草地资源合理利用提供依据,本研究以不同放牧强度(禁牧作为对照组 $G_0=0$ cow. AU·hm⁻²,轻度放牧 $G_1=0.23$ cow. AU·hm⁻²,轻中度放牧 $G_2=0.34$ cow. AU·hm⁻²,中度放牧 $G_3=0.46$ cow. AU·hm⁻²,中重度放牧 $G_4=0.69$ cow. AU·hm⁻²,重度放牧 $G_5=0.92$ cow. AU·hm⁻²)下的羊草草甸草原植物群落为材料,通过植物群落调查,计算多样性指数及生态位指数。结果表明,随着放牧强度增加,多样性指数先升后降,在中度放牧达峰值;各处理物种重要值变化显著,羊草优势地位被寸草(*Carex duriuscula*)取代;重要值与生态位宽度正相关,并在轻中度放牧、中度放牧相关性最强;生态位重叠值先增后减,轻中度放牧、中度放牧种间竞争压力平稳。因此,根据物种生态位宽度与重叠值控制放牧家畜头数,进而使草地生态系统趋于稳定,有助于实现草地可持续利用。

关键词:放牧强度;物种多样性;生态位宽度;生态位重叠;草甸草原

中图分类号:S812

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)02-0403-12

The Influences of Grazing Intensity on the Composition of Plant Communities and Ecological Niches in the *Leymus chinensis* Meadow Steppe

BI Xin¹, YU Tian-qi², SHI Meng-yuan², XIN Xiao-ping², ZHANG Zhi-tao¹, YAN Rui-rui^{2*}, HAN Guo-dong^{1*}

(1. College of Grassland Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China;

2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: This study aimed to explore the changes and linkages of plant community species diversity and niche under different grazing intensities in (*Leymus chinensis*) meadow steppe, providing a basis for rational utilization of grassland resources. Taking plant communities in *Leymus chinensis* meadow steppe under six grazing intensities, including no grazing ($G_0=0$ cow. AU·hm⁻²), light grazing ($G_1=0.23$ cow. AU·hm⁻²), light-moderate grazing ($G_2=0.34$ cow. AU·hm⁻²), moderate grazing ($G_3=0.46$ cow. AU·hm⁻²), moderate-heavy grazing ($G_4=0.69$ cow. AU·hm⁻²), and heavy grazing ($G_5=0.92$ cow. AU·hm⁻²), as research materials, we conducted plant community surveys and calculated diversity indices and niche indices. The results showed that diversity indices first increased and then decreased with increasing grazing intensity, peaking at moderate grazing. The species importance values changed significantly, where the dominant position of *Leymus chinensis* was replaced by *Carex duriuscula* as the important values gradually decreased. The importance value was positively correlated with niche breadth, and the correlation was the strongest under light-moderate grazing and moderate grazing. The niche overlap value first increased and then decreased, while the interspecific competition pressure

收稿日期:2025-02-14;修回日期:2025-03-28

基金项目:国家自然科学基金面上项目(32371781);国家重点研发计划项目(2021YFD1300503);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(1610132024003);内蒙古中央引导地方科技发展资金(2025ZY0018);内蒙古自治区科技“突围”工程“揭榜挂帅”项目(2025KJTW0025-03);呼伦贝尔市科技计划项目(SF2023007);内蒙古科技厅(2022PT0003);草学学科(YLXKZX-NND-001)资助

作者简介:毕鑫(2000-),女,汉族,内蒙古巴彦淖尔人,硕士研究生,主要从事草地资源生态与管理研究, E-mail: bxin@imau.edu.cn; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: nmghanguodong@163.com; yanrui@caas.cn

remained stable under light-moderate grazing and moderate grazing. Therefore, controlling the number of grazing livestock based on the niche breadth and overlap value of species could help stabilize the grassland ecosystem and facilitate the sustainable utilization of grasslands.

Key words: Grazing intensity; Species diversity; Niche breadth; Niche overlap; Meadow steppe

呼伦贝尔草原处于欧亚草原的东部边缘地带,总面积为 995.08 万 hm^2 , 占内蒙古草原面积的 13.27%^[1]。作为内蒙古境内草原的重要组成部分,呼伦贝尔主要草地类型是草甸草原,是国家大力保护与建设的生态资源库。1987 年到 2015 年间呼伦贝尔草原退化幅度较大,近 30 年退化了约 17%^[2],相关研究发现直接影响因素是人类活动,包括放牧、开矿和修路等^[3]。放牧是草地资源消耗的主要形式,长期不合理利用草地导致草原上植物群落多样性下降、草地生产力衰退^[4],是草地退化的根本原因。因此,研究羊草草甸草原草地群落生态对合理放牧和实现草地可持续利用具有深远意义。

物种多样性被认为是群落物种数目或丰富度和均匀度综合起来的一个单一统计量^[5]。物种多样性可以反映植物群落结构和功能特征以及草地生态系统的稳定性:物种多样性越高、群落结构越复杂,表明该草地生态系统抵抗自然及人为干扰能力也越强^[6]。有学者提出中度干扰假说(Intermediate disturbance hypothesis, IDH),认为物种丰富度和多样性指数随着放牧强度的增加呈单峰变化,即在中度放牧强度下能够维持较高的多样性,重度放牧使得多样性降低^[7-8],国内开展的草地放牧实验研究大多支持这一假说^[9-12]。也有研究认为放牧会降低草地群落的物种多样性,原生优势种逐渐被适口性较差的物种所替代,适口性较好的牧草种数减少^[13-14]。还有研究发现草地植物多样性对放牧强度的响应存在季节性差异,例如在高寒草地的夏季牧场,物种丰富度随着放牧强度的增强而增加,而在冬季牧场,物种丰富度呈现单峰响应^[15]。然而,随着人类对地球环境的干扰日益增强,草原生态系统正面临生物多样性锐减与生产力衰退的双重挑战,这导致其为人类持续提供稳定生态功能和服务的能力显著削弱^[16-18]。因此,了解草原生态系统在面对不同程度干扰时其植物群落结构与功能特征以及生态系统的稳定性对于可持续生态系统管理和决策至关重要^[19-21]。

生态位理论是研究在一定空间内占据资源的植物群落及其种内、种间关系(如稳定共存、进化演替和种间竞争)的理论^[22]。经典的生态位理论认为,物种对资源利用的差异导致物种间的生态位分

化,这是物种共存的基本机制之一,也是群落结构变化和植被演替的主要动力^[23]。但是,有学者对综合植被类型与群落演替展开深入探究,结果表明,植被、土壤等生态因子对植物物种生态位特征具有关键影响,植物生态位宽度呈现出物种特异性,不同植物种类的生态位宽度各异^[24]。此外,放牧作为一种重要的人为干扰因素,能够改变植物群落的演替轨迹,驱动植物群落朝着稳定状态发展^[25]。放牧改变了群落生境、种群生态适应程度和生态位重叠值,进而改变了植物群落的种间关系^[26]。重度放牧通过影响群落物种多样性、结构组成,削弱了非优势种的生态功能贡献,破坏了多物种间的协同关系,最终导致群落整体多物种功能性组织能力下降^[27]。因此通过研究植物种群生态位,可以揭示不同种植物对环境资源的利用率、同种植物对不同资源的利用程度以及种间的互作关系^[28]。

近年来,学者们对于羊草草甸草原的研究主要集中于土壤微生物的代谢活动^[29]、羊草功能性状^[30]、植物群落功能群及多样性^[31]、地上净初级生产力^[32]、植物器官及群落氮磷化学计量^[33]、生物量分布^[34]等,但对羊草草甸草原不同放牧强度下生态位与物种多样性的影响的研究较少。基于此,本研究基于呼伦贝尔羊草草甸草原放牧平台,以不同放牧强度下的植物群落为研究对象,通过计算物种多样性和生态位并找出二者之间的相关性,探讨放牧对草地植物群落的影响,为草地保护、维持草畜平衡和制定合理的放牧政策提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区呼伦贝尔市谢尔塔拉种牛牛场东部 3 km,国家野外观测站控制性放牧实验样地(49°32'942"~49°33'321"N,119°94'888"~119°96'434"E),海拔 670~677 m,地处大兴安岭西麓丘陵向内蒙古高原的过渡带,属温带半干旱大陆性季风气候,年平均温度 0℃左右,年平均降雨量 400 mm 以上,降水多集中在 9 月,无霜期约 110 d。土壤类型主要是暗栗钙土,草地类型为羊草草甸草

原,植被类型以中旱生植物为主,主要物种有羊草、寸草、贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、蓬子菜(*Galium verum*)等。

1.2 试验设计与样品采集

试验样地总面积为90 hm²,用网围栏分为18个5 hm²的小区,采用随机区组排列设置了3个重复,6个放牧强度,通过调控单位面积草地上放牧牛的头数来设置不同放牧强度,分别为0,2,3,4,6,8头,共69头。依据载畜率分为不同放牧强度:对照组(禁牧)G₀=0 cow·AU·hm⁻²;轻度放牧G₁=0.23 cow·AU·hm⁻²;轻中度放牧G₂=0.34 cow·AU·hm⁻²;中度放牧G₃=0.46 cow·AU·hm⁻²;中重度放牧G₄=0.69 cow·AU·hm⁻²;重度放牧G₅=0.92 cow·AU·hm⁻², (1AU相当于一头500 kg成牛)。放牧期为2023年6月1日到10月1日(其余月份均为禁牧期),草地面积恒定,进行单因子试验。样品采集于2023年8月生物量高峰期,在每个试验小区随机取5个1 m×1 m的样方,进行群落调查,记录植物种类、高度、盖度、多度等,将植物地上绿色部分和枯落物刈割装入信封袋并带回室内称鲜重,80℃烘干至恒重称重。

1.3 数据计算方法

重要值计算公式:

重要值:IV=(RC+RH+RD+RB)/4×100

式中,IV为重要值,RC为相对盖度,RH为相对高度,RD为相对密度,RB为相对地上生物量。

物种多样性计算公式:

Margalef丰富度指数 $M=(S-1)/\ln N$

Shannon-Wiener多样性指数 $H=-\sum(P_i \ln P_i)$

Simpson多样性指数 $D=1-\sum P_i^2$

Pielou均匀度指数 $J=H/\ln S$

式中: P_i 为样方内物种*i*的相对重要值, $P_i=N_i/N$; N_i 为物种*i*的绝对重要值, N 为物种*i*所在样方的各个植物种的绝对重要值总和, S 为样方内的物种数。

生态位宽度计算公式:

Shannon生态位宽度^[35]: $B_i=-\sum_{j=1}^r P_{ij} \ln P_{ij}$

式中, r 为样方总数, B_i 为物种*i*的生态位宽度, P_{ij} 为物种*i*在资源*j*下的重要值占该物种在所有资源重要值的比例。

生态位重叠计算公式:

$$\text{Pianka生态位重叠}^{[36]}: O_{ik} = \frac{\sum P_{ij} P_{kj}}{\sqrt{\sum P_{ij}^2 \sum P_{kj}^2}}$$

式中, O_{ik} 为物种*i*与物种*k*生态位重叠程度, P_{ij} 和 P_{kj} 分别为物种*i*和物种*k*在资源*j*下的重要值占该物种在所有资源重要值的比例。

1.4 数据处理

运用Excel 2010软件整理数据,计算物种重要值和生态位宽度;采用DPS 18.1软件计算生态位重叠值,将生态位重叠值划分为<0.25,0.25~0.5,0.5~0.75,>0.75四个区间^[37],并据此分析各放牧强度下生态位重叠值的分布特征;采用SPSS 26.0软件计算物种多样性,并进行单因素方差(One-Way ANOVA)分析, $P<0.05$ 为差异显著,分析不同放牧强度对植物群落物种多样性的影响;利用Origin 2019软件进行物种生态位重叠与重要值之间的线性回归分析与制图。

2 结果与分析

2.1 不同放牧强度植物物种多样性

Shannon-Wiener多样性指数、Simpson多样性指数和Pielou均匀度指数均于G₃达到峰值,且G₃处理与G₁,G₂,G₄,G₅差异均不显著。Simpson多样性指数在所有放牧强度下均无显著差异。Margalef丰富度指数于G₂达到峰值,G₂与G₃,G₄差异不显著(图1)。由此可知,随着放牧强度增加,四种指数均呈先增后减的趋势,放牧强度G₂,G₃物种丰富度与多样性较高,群落构成复杂。

2.2 不同放牧强度物种重要值

不同放牧强度下主要物种重要值有明显差异(表1)。重要值总和排序为G₀>G₁>G₃>G₂>G₄>G₅,羊草、展枝唐松草(*Thalictrum squarrosom*)、蓬子菜等物种的重要值随着放牧强度增加逐渐减小,寸草、洽草(*Koeleria macrantha*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)等物种重要值随着放牧强度的增加逐渐增加且在G₅下达到最大值,羊草的优势度逐渐减小,在G₅重要值仅有1.66,其优势地位被寸草取代。冷蒿的重要值在G₅达到峰值,此现象预示着草地会发生逆行演替。细叶白头翁(*Pulsatilla turczaninovii*)、细叶柴胡(*Bupleurum angustissimum*)、狭叶青蒿(*Artemisia dracunculus*)等物种的重要值随着放牧强度增加呈先上升后下降的趋势并于G₃达到峰值。

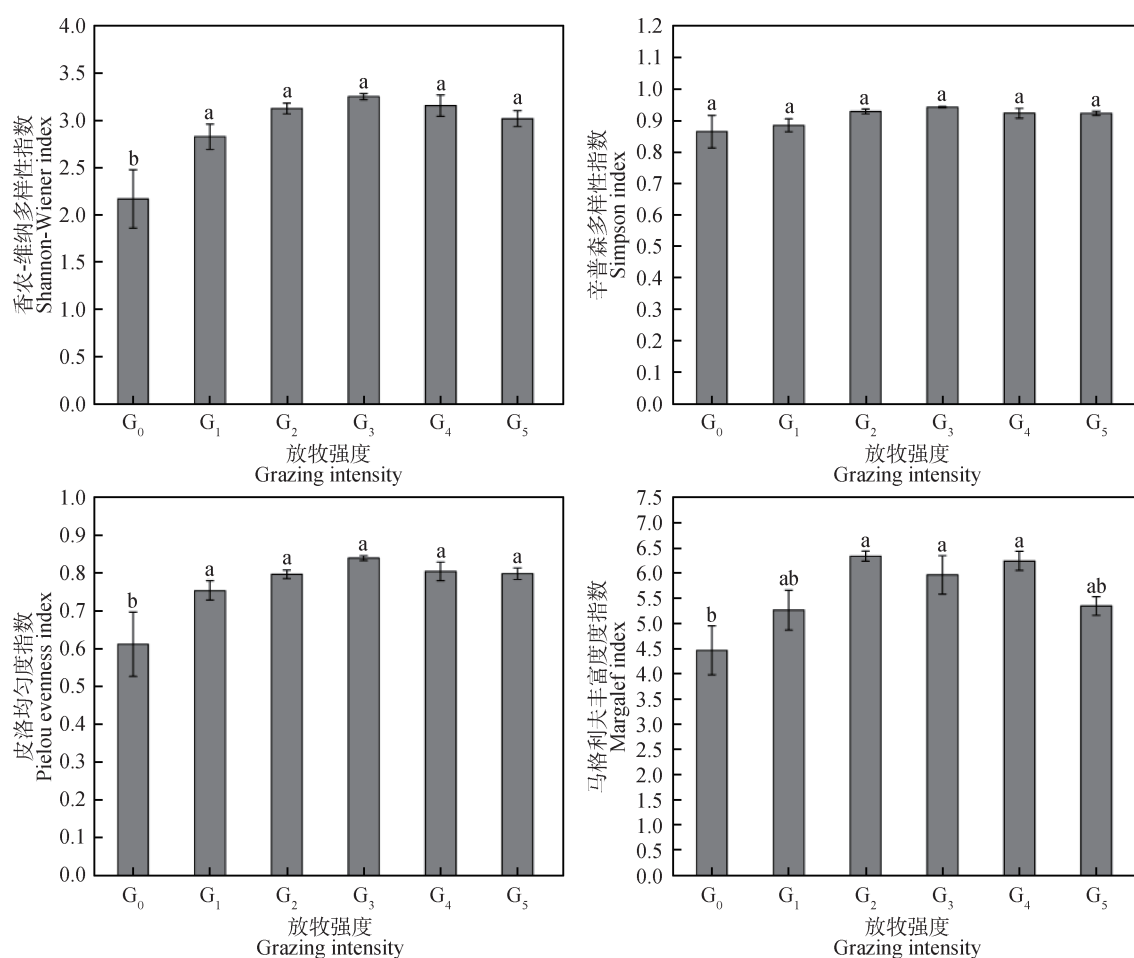


图 1 不同放牧强度下群落物种多样性与丰富度的变化

Fig. 1 Changes of community species diversity and richness under different grazing intensities

注:不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。G₀为对照组,G₁为轻度放牧,G₂为轻中度放牧,G₃为中度放牧,G₄为中重度放牧,G₅为重度放牧。下同

Note: Different lowercase letters mean significant differences ($P < 0.05$). G₀ stands for control group, G₁ stands for light grazing, G₂ stands for light-moderate grazing, G₃ stands for moderate grazing, G₄ stands for moderate-heavy grazing, and G₅ stands for heavy grazing. The same as below

2.3 不同放牧强度物种生态位宽度

在不同放牧强度下对主要物种生态位指标进行测定,结果发现不同放牧强度下主要物种生态位宽度值具有一定的差异(表2)。羊草、羽茅(*Achnatherum sibiricum*)、展枝唐松草等物种在不放牧条件下生态位宽度值处于前列,放牧强度越高生态位宽度值越低,羊草的生态位宽度值由0.35降低至0.07,该物种生态位泛化程度显著降低;寸草、冷蒿、贝加尔针茅等物种生态位宽度值随着放牧强度的增加而增大,其中禾本科植物有贝加尔针茅、糙隐子草、早熟禾(*Poa annua*)、洽草,在G₅中生态位宽度均为最大值;细叶白头翁、斜茎黄芩(*Astragalus laxmannii*)、狭叶青蒿等物种的生态位宽度值则

呈现出先增加后减小的变化,在G₃有最大值。生态位宽度值总和排序为G₃ > G₂ > G₁ > G₄ > G₅ > G₀,G₂和G₃的植物群落生态位宽度值较大。将不同放牧强度下植物群落的重要值和生态位宽度值进行非线性回归分析(图2),重要值与生态位宽度值均呈现正相关关系,随着放牧强度的增加, R^2 的值依次为0.997,0.998,0.999,0.999,0.996,0.995。G₃和G₂相关指数接近1,其解释度达峰值,重要值与生态位宽度值相关性越大,重要值对生态位宽度影响越大,物种的适应程度和竞争能力有99.9%是由物种在群落中的地位引起的;G₅重要值只可以解释生态位宽度值变异的99.5%,剩下的0.05%则由其它因素(环境因素、生理因素等)所解释。

表 1 不同放牧强度下主要物种的重要值
Table 1 Importance values of major species under different grazing intensities

编号 Number	物种 Species	重要值 Importance value					
		G ₀	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅
1	阿尔泰狗娃花 (<i>Aster-Aster altaicus</i>)	1.33±0.56	1.92±0.59	2.34±0.36	1.52±0.13	0.45±0.14	0.21±0.21
2	贝加尔针茅 (<i>Stipa baicalensis</i>)	1.41±0.18	1.88±0.30	1.65±0.26	2.36±0.37	2.30±0.24	3.15±0.26
3	糙隐子草 (<i>Cleistogenes squarrosa</i>)	0.16±0.12	0.56±0.28	1.63±0.09	2.72±0.48	4.21±0.18	5.43±0.68
4	草地麻花头 (<i>Klasea centauroides</i>)	1.96±0.19	2.20±0.06	1.96±0.17	2.54±0.68	3.37±0.31	2.07±0.25
5	叉枝鸦葱 (<i>Lipschitzia divaricata</i>)	0.53±0.12	1.08±0.23	1.04±0.20	1.27±0.20	0.66±0.12	0.86±0.14
6	达乌里芯芭 (<i>Cymbaria daurica</i>)	0.13±0.07	0.53±0.16	0.31±0.17	1.12±0.43	0.75±0.38	0.23±0.12
7	多裂叶荆芥 (<i>Schizonepeta multifida</i>)	0.35±0.02	0.80±0.24	1.28±0.73	1.79±0.28	0.97±0.11	0.90±0.22
8	二裂委陵菜 (<i>Sibbaldianthe bifurca</i>)	2.86±1.25	3.51±0.85	1.36±0.25	1.83±0.41	2.18±0.81	0.60±0.16
9	菊叶委陵菜 (<i>Potentilla tanacetifolia</i>)	0.30±0.16	0.23±0.16	0.23±0.09	0.18±0.06	1.52±0.51	1.46±0.03
10	冷蒿 (<i>Artemisia frigida</i>)	0.07±0.05	0.45±0.29	2.29±1.04	2.81±0.77	3.34±1.90	12.37±3.75
11	裂叶蒿 (<i>Artemisia tanacetifolia</i>)	6.94±1.22	10.53±1.94	12.03±2.99	9.79±1.99	13.75±7.58	4.90±1.78
12	棉团铁线莲 (<i>Clematis hexapetala</i>)	0.27±0.27	0.38±0.24	0.37±0.19	0.13±0.13	0.49±0.34	0.12±0.12
13	囊花鸢尾 (<i>Iris ventricosa</i>)	3.75±0.63	2.65±0.04	4.05±0.18	2.97±1.16	0.67±0.11	1.05±0.71
14	蓬子菜 (<i>Galium verum</i>)	1.66±0.17	1.68±0.11	1.43±0.29	1.42±0.51	1.23±0.47	0.13±0.13
15	洽草 (<i>Koeleria macrantha</i>)	0.34±0.06	0.83±0.29	1.24±0.20	2.07±0.52	3.22±0.90	5.51±1.06
16	柄状薹草 (<i>Carex pediformis</i>)	6.99±1.21	6.16±0.81	2.90±0.53	3.06±1.40	5.08±3.15	1.55±0.70
17	沙参 (<i>Adenophora stricta</i>)	2.32±0.72	1.69±0.69	0.70±0.36	0.72±0.29	0.62±0.15	0.42±0.28
18	双齿葱 (<i>Allium bidentatum</i>)	0.27±0.18	0.65±0.24	1.69±0.07	1.70±0.32	1.73±0.29	1.05±0.20
19	寸草 (<i>Carex duriuscula</i>)	1.93±0.88	3.02±0.78	6.67±1.55	10.73±0.48	13.06±2.76	15.75±1.91
20	细叶白头翁 (<i>Pulsatilla turczaninovii</i>)	2.41±0.60	4.23±0.57	7.47±0.55	10.43±1.24	5.67±0.34	5.29±0.63
21	细叶柴胡 (<i>Bupleurum angustissimum</i>)	0.26±0.13	1.16±0.44	1.89±0.68	1.97±0.69	1.68±1.29	0.69±0.17
22	细叶鸦葱 (<i>Takhtajianantha pusilla</i>)	0.06±0.06	0.47±0.43	0.42±0.10	1.18±0.21	0.61±0.14	0.09±0.09
23	狭叶青蒿 (<i>Artemisia dracunculus</i>)	1.23±0.93	2.55±1.49	2.78±0.44	4.06±1.03	1.11±0.73	0.06±0.06
24	狭叶野豌豆 (<i>Vicia amoena</i>)	1.97±0.45	1.51±0.14	1.49±0.21	1.05±0.18	0.76±0.15	0.28±0.15
25	斜茎黄芪 (<i>Astragalus laxmannii</i>)	2.01±1.09	0.75±0.75	1.58±0.36	2.48±1.05	1.33±0.33	1.36±0.09
26	羊草 (<i>Leymus chinensis</i>)	38.46±3.35	28.80±4.99	14.46±2.83	9.73±1.36	2.53±0.96	1.66±0.24
27	异燕麦 (<i>Helictochloa hookeri</i>)	0.58±0.31	1.04±0.25	0.91±0.34	0.89±0.35	0.72±0.32	0.81±0.16
28	羽茅 (<i>Achnatherum sibiricum</i>)	3.84±0.62	4.54±1.89	1.36±0.75	1.55±0.36	1.28±0.23	0.66±0.18
29	早熟禾 (<i>Poa annua</i>)	0.47±0.37	0.79±0.47	0.72±0.19	0.84±0.15	1.06±0.28	2.28±0.45
30	展枝唐松草 (<i>Thalictrum squarrosum</i>)	9.04±1.61	7.18±2.21	7.66±1.28	2.70±0.18	1.80±0.36	0.58±0.18
总和 Summation		93.89±0.59	93.75±0.73	85.89±0.58	87.60±0.58	78.13±0.85	71.53±0.50

2.4 不同放牧强度物种生态位重叠

生态位重叠值是描述两个物种对于资源竞争的情况的指标,根据测算不同放牧强度下主要物种的生态位重叠,结果发现不同放牧强度下种间竞争压力不同(图3)。随着放牧强度的增加,生态位重叠值呈现先增加后减少的趋势,G₂和G₃中气泡重叠度较高,此时不同物种对于资源的利用相似性高,G₁,G₄和G₅气泡图稀疏重叠度较小,种间对相同资源利用的竞争较小。生态位重叠区间更直观地体现了各放牧强度的竞争情况(表3),G₂和G₃生态位重叠值小于0.25的为0%,G₂生态位重叠值处于0.25~0.5区间的占1.84%,有8种对,G₃生态位

重叠值处于0.25~0.5区间的占2.99%,有13种对,G₂和G₃生态位重叠值处于0.50~0.75区间占比仅相差0.45%,种对数分别是68和70,两者生态位重叠值主要集中在大于0.75区间内,占比高达82.30%和80.69%,分别有358种对和351种对。G₁与G₄生态位重叠值各区间占比相似,两个不同放牧强度物种对相同资源利用的竞争强度也相似,G₅生态位重叠值高于G₀,G₅生态位重叠值处于大于0.75区间的有277种对,而G₀则只有252种对。不同放牧强度物种间生态位重叠值主要集中在大于0.75的区间内,随着放牧强度的增加,该区间的种对数出现先增加后减小的变化。

表 2 不同放牧强度下主要物种的生态位宽度

Table 2 Niche width of major species under different grazing intensities

编号 Number	物种 Species	生态位宽度 Niche width					
		G ₀	G ₁	G ₂	G ₃	G ₄	G ₅
1	阿尔泰狗娃花 (<i>Aster-Aster altaicus</i>)	0.05±0.02	0.08±0.01	0.09±0.01	0.06±0.00	0.02±0.01	0.01±0.01
2	贝加尔针茅 (<i>Stipa baicalensis</i>)	0.05±0.01	0.06±0.02	0.07±0.01	0.09±0.01	0.09±0.01	0.11±0.01
3	糙隐子草 (<i>Cleistogenes squarrosa</i>)	0.01±0.01	0.03±0.01	0.07±0.00	0.10±0.01	0.13±0.00	0.16±0.01
4	草地麻花头 (<i>Klasea centauroides</i>)	0.07±0.01	0.08±0.01	0.08±0.00	0.09±0.02	0.11±0.01	0.08±0.01
5	叉枝鸦葱 (<i>Lipschitzia divaricata</i>)	0.02±0.01	0.04±0.01	0.05±0.01	0.06±0.01	0.03±0.00	0.04±0.01
6	达乌里苣荬 (<i>Cymbaria daurica</i>)	0.01±0.00	0.04±0.00	0.02±0.01	0.05±0.01	0.03±0.02	0.01±0.01
7	多裂叶荆芥 (<i>Schizonepeta multifida</i>)	0.02±0.00	0.04±0.00	0.05±0.02	0.07±0.01	0.04±0.00	0.04±0.01
8	二裂委陵菜 (<i>Sibbaldianthe bifurca</i>)	0.08±0.02	0.11±0.01	0.06±0.01	0.07±0.01	0.08±0.02	0.03±0.01
9	菊叶委陵菜 (<i>Potentilla tanacetifolia</i>)	0.02±0.01	0.03±0.01	0.01±0.00	0.01±0.00	0.06±0.02	0.06±0.00
10	冷蒿 (<i>Artemisia frigida</i>)	0.00±0.00	0.03±0.01	0.08±0.03	0.10±0.02	0.10±0.04	0.25±0.04
11	裂叶蒿 (<i>Artemisia tanacetifolia</i>)	0.16±0.01	0.22±0.03	0.25±0.04	0.22±0.03	0.23±0.08	0.14±0.04
12	棉团铁线莲 (<i>Clematis hexapetala</i>)	0.01±0.01	0.03±0.01	0.02±0.01	0.01±0.01	0.02±0.01	0.01±0.01
13	囊花鸢尾 (<i>Iris ventricosa</i>)	0.11±0.03	0.12±0.02	0.13±0.00	0.10±0.03	0.03±0.00	0.04±0.03
14	蓬子菜 (<i>Galium verum</i>)	0.06±0.01	0.07±0.00	0.06±0.01	0.06±0.02	0.05±0.02	0.01±0.01
15	洽草 (<i>Koeleria macrantha</i>)	0.02±0.00	0.03±0.02	0.05±0.01	0.08±0.02	0.11±0.02	0.16±0.02
16	柄状薹草 (<i>Carex pediformis</i>)	0.16±0.03	0.15±0.01	0.10±0.01	0.10±0.04	0.13±0.06	0.06±0.02
17	沙参 (<i>Adenophora stricta</i>)	0.08±0.02	0.05±0.02	0.03±0.02	0.03±0.01	0.03±0.01	0.02±0.01
18	双齿葱 (<i>Allium bidentatum</i>)	0.01±0.01	0.03±0.01	0.07±0.00	0.07±0.01	0.07±0.01	0.05±0.01
19	寸草 (<i>Carex duriuscula</i>)	0.06±0.03	0.13±0.02	0.18±0.02	0.24±0.01	0.26±0.03	0.29±0.02
20	细叶白头翁 (<i>Pulsatilla turczaninovii</i>)	0.07±0.02	0.14±0.00	0.19±0.01	0.23±0.02	0.16±0.01	0.15±0.01
21	细叶柴胡 (<i>Bupleurum angustissimum</i>)	0.01±0.01	0.07±0.01	0.07±0.02	0.08±0.02	0.06±0.04	0.03±0.01
22	细叶鸦葱 (<i>Takhtajaniantha pusilla</i>)	0.00±0.00	0.04±0.02	0.02±0.00	0.05±0.01	0.03±0.01	0.01±0.01
23	狭叶青蒿 (<i>Artemisia dracunculus</i>)	0.05±0.03	0.11±0.02	0.10±0.01	0.13±0.02	0.04±0.03	0.00±0.00
24	狭叶野豌豆 (<i>Vicia amoena</i>)	0.07±0.02	0.04±0.02	0.06±0.01	0.05±0.01	0.04±0.01	0.02±0.01
25	斜茎黄芪 (<i>Astragalus laxmannii</i>)	0.06±0.04	0.02±0.02	0.06±0.01	0.09±0.03	0.06±0.01	0.06±0.00
26	羊草 (<i>Leymus chinensis</i>)	0.35±0.02	0.35±0.01	0.27±0.03	0.23±0.02	0.09±0.02	0.07±0.01
27	异燕麦 (<i>Helictochloa hookeri</i>)	0.02±0.01	0.03±0.02	0.04±0.01	0.04±0.01	0.03±0.01	0.04±0.01
28	羽茅 (<i>Achnatherum sibiricum</i>)	0.11±0.02	0.11±0.05	0.05±0.02	0.06±0.01	0.06±0.01	0.03±0.01
29	早熟禾 (<i>Poa annua</i>)	0.02±0.02	0.03±0.02	0.04±0.01	0.04±0.01	0.05±0.01	0.09±0.01
30	展枝唐松草 (<i>Thalictrum squarrosum</i>)	0.19±0.04	0.19±0.04	0.19±0.02	0.10±0.00	0.07±0.01	0.03±0.01
总和 Summation		1.94±0.01	2.50±0.01	2.57±0.01	2.70±0.01	2.33±0.01	2.09±0.01

3 讨论

3.1 放牧强度对植物物种多样性的影响

对于不同放牧强度下草地植物群落物种多样性的研究有很多,其研究结果均符合中度干扰假说^[38-43]。在本研究中,对照组 G₀物种多样性最低,中度放牧 G₃的表现较为突出,Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和 Peilou 均匀度指数均达最大值,表明该处理物种多样性水平较高,物种分布均匀,Margalef 丰富度指数在 G₂达到峰值但与 G₃差异不显著,意味着两者丰富度均处于较高水平,这一研究结果与李永宏^[44]的研究结果一致。邓彤彤等^[45]研究发现,中度放牧下 Margalef 丰富度指数、Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和 Peilou 指数最大,

而重度放牧下物种多样性最低。与本实验存在差异的原因可能是:(1)试验地海拔、气候不同。温性草甸草原处于中纬度地区,气候条件为温带半干旱大陆性季风气候,禁牧时,优势种[如羊草、贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*)等]会过度繁殖,形成密集群落,遮挡阳光并垄断资源,抑制低矮草本和杂草生长,导致物种丰富度下降^[46]。(2)试验地干扰耐受性不同。温带草甸草原物种组成包含大量耐啃食、耐践踏的草本,如寸草、柄状薹草(*Carex pediformis*)等,在重度放牧下也能维持一定水平的多样性^[47]。因此,对于温带草甸草原来说,适度放牧可以增加植物群落物种多样性,不合理放牧与不放牧导致植物群落物种多样性降低^[48]。

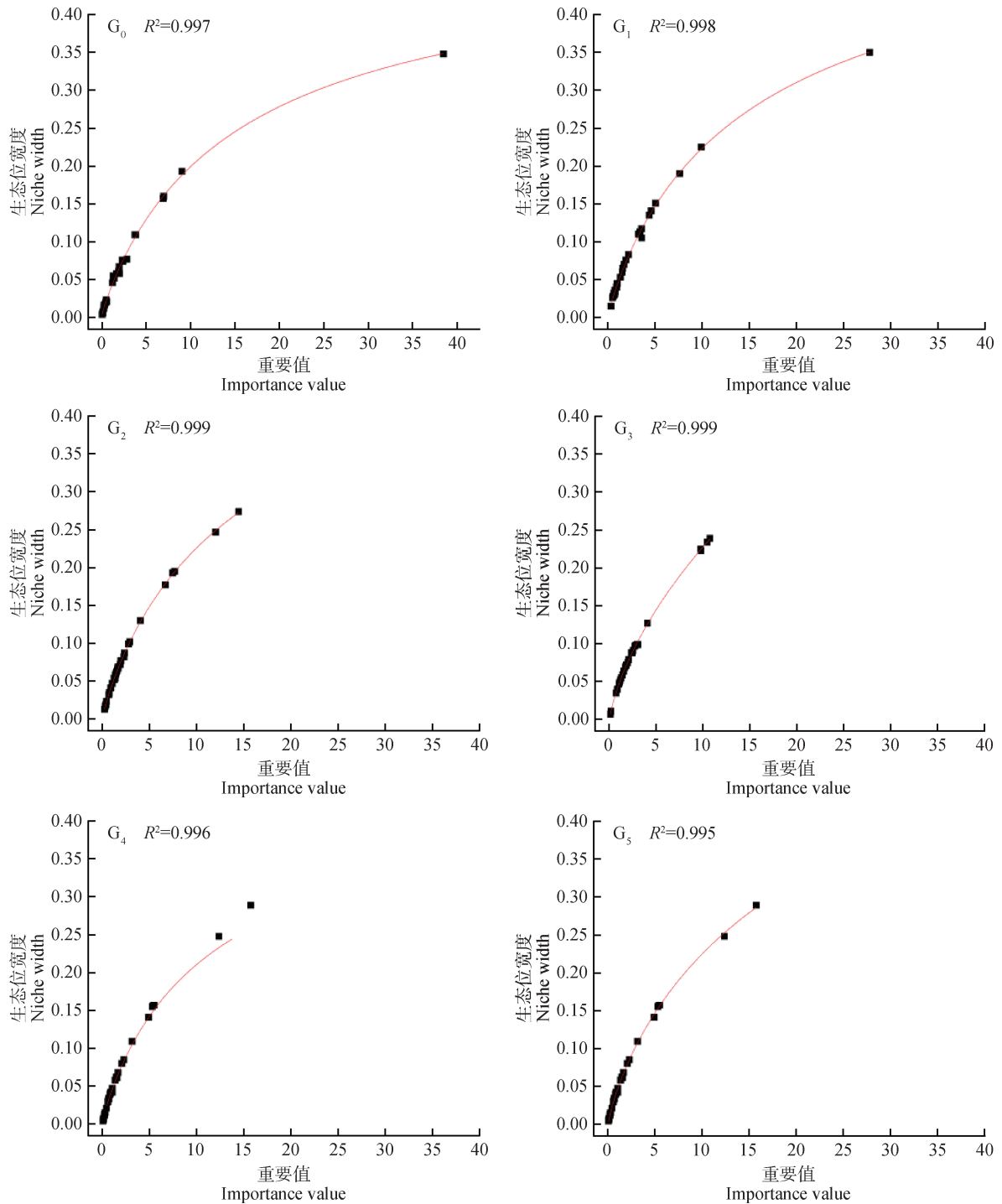


图2 不同放牧强度下主要物种重要值与生态位的关系

Fig. 2 Relationship between importance value and niche width of major species under different grazing intensities

3.2 放牧强度对物种重要值的影响

本研究中,随着放牧强度的增加,羊草在 G₀, G₁, G₂ 中重要值最高,作为优势种,其优势度逐渐减小,在 G₃, G₄, G₅ 重要值显著减小并被寸草取代优势地位。放牧强度逐渐增加诸多禾本科植物,如洽草、贝加尔针茅、糙隐子草等,在 G₀, G₁, G₂ 中重要值较小,但从 G₃ 开始重要值显著增加。这与 Cole^[49] 的

研究结果一致,其根本原因在于放牧家畜头数的增多,家畜排粪排尿行为增加了草地土壤养分含量,禾本科植物对土壤养分增加反应迅速,而羊草被大量采食导致种间竞争力下降,其他禾本科植物在种间竞争中处于主导地位^[50]。放牧强度增加,植物群落中处于优势地位的物种发生变化^[51],一些原本处于劣势地位的物种[如冷蒿、细叶白头翁、菊叶委陵

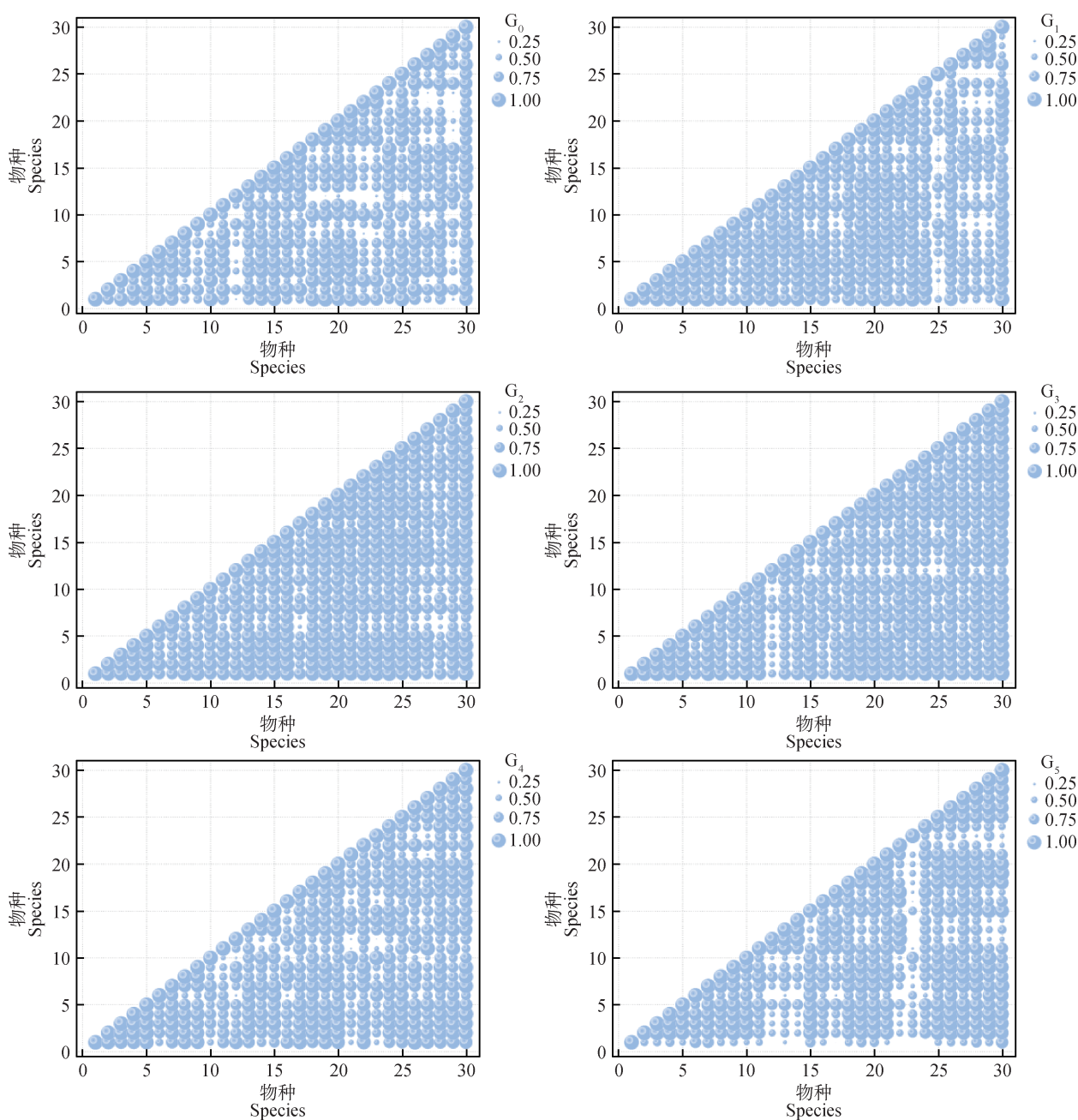


图3 不同放牧强度主要物种生态位重叠值

Fig. 3 Niche overlap of major species under different grazing intensities

注:横纵坐标物种与表3相对应。气泡大小表示物种生态位重叠值大小

Note: The species on the horizontal and vertical axes correspond to those in Table 3 respectively. Bubble size indicates the size of species niche overlap

菜(*Potentilla tanacetifolia*)等]重要值增加,对于这一现象Pulungan等^[52]的研究表明在中等放牧强度下物种多样性最高,但放牧家畜头数的增加抑制了优势种的繁殖优势,有利于劣势物种的共存。重要值总和排序: $G_0 > G_1 > G_3 > G_2 > G_4 > G_5$, G_3 和 G_2 群落结构相对稳定。

3.3 放牧强度对种群生态位宽度的影响

生态位宽度体现了物种在其生境中对资源的利用和适应环境变化的能力。在本研究中,不放牧条件下生态位宽度最大的是羊草,值为0.35,其次是展枝唐松草、柄状薹草等;随着放牧强度持续增加,羊草的生态位宽度显著减小。在 G_3 , G_4 , G_5 处理

表3 不同放牧强度主要物种生态位重叠值的区间
Table 3 Niche overlap of major species in each interval under different grazing intensities

放牧强度 Grazing intensity	生态位重叠值各区间百分比 Percent of niche overlap values in each interval/%			
	<0.25	0.25~0.50	0.50~0.75	>0.75
G ₀	5.74	7.36	28.97	57.93
G ₁	2.30	5.75	20.92	70.80
G ₂	0.00	1.84	15.63	82.30
G ₃	0.00	2.99	16.09	80.69
G ₄	1.61	5.75	23.22	69.43
G ₅	3.91	9.43	22.99	63.68

下,羊草的种间竞争能力逐渐减弱,最终在G₅处理下,寸草占据竞争优势地位,同时冷蒿、冷蒿等植物也展现出较强的竞争力。这一现象可能是由于家畜采食、践踏致使羊草叶片生长受阻,受到放牧胁迫导致生态位宽度下降^[53],其生态位宽度相应增加^[54]。细叶白头翁、斜茎黄芩、狭叶青蒿等物种的生态位宽度先增加后减小,则表明这些物种的最适生境是G₃。放牧强度达到最大限度G₅时,冷蒿的生态位宽度值跃居第二,作为放牧退化草原植被群落演替的指示种,冷蒿通过化感作用占据植物群落优势地位,竞争能力极强,不加以干预将会加速群落演替进程,导致草原植被群落严重退化^[55]。生态位宽度值总和排序:G₃>G₂>G₁>G₄>G₅>G₀,G₃和G₂群落物种生态位宽度值较大,是资源利用较为合理的放牧处理。不同放牧强度下植物群落的重要值与生态位宽度值呈正相关关系,说明植物物种在群落中所处的优势地位决定了其与其他物种竞争能力,G₂和G₃的R²接近1,重要值和生态位宽度值相关性最大,解释度最高,维持了草地的高多样性,并且实现了对资源利用最大化。

3.4 放牧强度对种群生态位重叠值的影响

生态位重叠体现了物种对资源利用的程度,数值大小表示两个物种之间对相同资源利用的相似程度^[56]。本研究中,不放牧处理G₀生态位重叠值小于放牧处理,由于没有放牧干扰,羊草作为优势种占据了大部分资源,抑制了其他物种对资源的利用,在资源竞争中处于主导地位。在G₂和G₃中,生态位重叠值<0.25的为0种对,G₃中生态位重叠值在0.25~0.75区间内的种对数大于G₂,两者生态位重叠值主要集中在>0.75区间内,占比均高于80%,种对数高于350,这一研究结果与赵利萌等^[37]的研究结果相似,主要原因是放牧促进了植物补偿

生长,植物生长所需资源增加,加剧了对相同资源利用的竞争^[57]。随着放牧强度增加,处于>0.75区间内的生态位重叠值先增大后减小,而处于其他三个区间内的生态位重叠值先减小后增大。此研究结果与王琪等^[58]的研究结果重度放牧下生态位重叠值增加不同,其原因在于草原类型不同,短花针茅荒漠草原物种多样性比羊草草甸草原低,水热条件差,在受到高强度的畜蹄践踏后恢复能力弱,有机质向土壤输入减少,导致土壤环境趋于干旱贫瘠,进而阻碍植物对养分的吸收。适度的放牧增加了植物补偿生长,生态位重叠值增加;但生态位重叠过大,种间竞争激烈,不利于物种多样性的增加^[59]。

4 结论

综上所述,本研究结果表明,Shannon-Wiener, Simpson和Pielou等多样性指数均随放牧强度增加呈先升后降的单峰趋势,在G₃处理下达到峰值, Margalef丰富度指数则在G₂处理时最大,综合说明G₃处理下物种多样性水平较高。群落结构上,G₂和G₃处理下种群优势度明显、稳定性良好,较高的强度放牧会改变植物群落结构。生态位分析显示,物种重要值与生态位宽度正相关,在G₂和G₃处理下相关性最强,生态位重叠值随着放牧强度增加先增后减,G₂和G₃处理组种间竞争稳定,有利于维持群落高多样性。

参考文献

- [1] 王世新,杨胜利,高娃,等. 呼伦贝尔草原资源面积变化分析[J]. 内蒙古草业,2008,20(1):49-51
WANG S X, YANG S L, GAO W, et al. Analysis of the changes in the resource area of Hulunbuir grassland[J]. Inner Mongolia Prataculture,2008,20(1):49-51
- [2] 倩娜,贾子金,那木汗,等. 呼伦贝尔草原植物资源现状调查研究[J]. 大连民族大学学报,2023,25(5):389-394
QIAN N, JIA Z J, NA M H, et al. Investigation and analysis on the status of grassland plant resources in Hulunbuir[J]. Journal of Dalian Minzu University,2023,25(5):389-394
- [3] 姜亚东,刘鑫,郑颖,等. 内蒙古草地资源退化现状及生态修复探索[J]. 草原与草业,2023,35(1):57-61
JIANG Y D, LIU X, ZHENG Y, et al. Status quo of grassland resource degradation and ecological restoration in Inner Mongolia[J]. Grassland and Prataculture,2023,35(1):57-61
- [4] 朱爱民,韩国栋,康静,等. 长期放牧对短花针茅荒漠草原植物功能群特征的影响[J]. 草地学报,2019,27(6):1459-1466

- ZHU A M, HAN G D, KANG J, et al. Effects of long-term grazing on characteristics of plant functional groups in *Stipa breviflora* desert steppe[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(6): 1459-1466
- [5] 孙龙, 国庆喜. 生态学基础[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2013: 50
- SUN L, GUO X Q. China building materials industry publication[M]. Beijing: Fundamentals of Ecology, 2013: 50
- [6] 张蕊, 赵学勇, 左小安, 等. 荒漠草原沙生针茅(*Stipa glareosa*)群落物种多样性和地上生物量对降雨量的响应[J]. 中国沙漠, 2019, 39(2): 45-52
- ZHANG R, ZHAO X Y, ZUO X A, et al. Responses of the *Stipa glareosa* community species diversity and above-ground biomass to precipitation in the desert-steppe region in northern China[J]. *Journal of Desert Research*, 2019, 39(2): 45-52
- [7] GRIME J P. Competitive exclusion in herbaceous vegetation[J]. *Nature*, 1973, 242(5396): 344-347
- [8] CONNELL J H. Diversity in tropical rain forests and coral reefs[J]. *Science*, 1978, 199(4335): 1302-1310
- [9] 郑伟, 董全民, 李世雄, 等. 放牧强度对环青海湖高寒草原群落物种多样性和生产力的影响[J]. 草地学报, 2012, 20(6): 1033-1038
- ZHENG W, DONG Q M, LI S X, et al. Impact of grazing intensities on community biodiversity and productivity of alpine grassland in Qinghai Lake Region[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2012, 20(6): 1033-1038
- [10] 刘冬伟, 张风承, 王明君, 等. 放牧强度对三江平原小叶章草甸群落特征及多样性的影响[J]. 中国草地学报, 2012, 34(2): 81-86
- LIU D W, ZHANG F C, WANG M J, et al. The influence of grazing intensity on community characteristics and diversity of *Deyeuxia angustifolia* meadow in Sanjiang Plain[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2012, 34(2): 81-86
- [11] 刘振国, 李镇清. 退化草原冷蒿群落13年不同放牧强度后的植物多样性[J]. 生态学报, 2006, 26(2): 475-482
- LIU Z G, LI Z Q. Plant biodiversity of *A Artemisia frigida* communities on degraded grasslands under different grazing intensities after thirteen-year enclosure[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(2): 475-482
- [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): 239-244
- MENG X H, LI X L, XIN X P, et al. Study on community characteristics and α diversity under different grazing intensity on *Leymus chinensis* (trin.) tzvel. meadow steppe of Hulunbeier[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2009, 17(2): 239-244
- [13] 朱绍宏, 徐长林, 方强恩, 等. 白牦牛放牧强度对高寒草原植物群落物种多样性的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2006, 41(4): 71-75
- ZHU S H, XU C L, FANG Q E, et al. Effect of white yak grazing intensity on species diversity of plant communities in alpine grassland[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2006, 41(4): 71-75
- [14] 王国杰, 汪诗平, 郝彦宾, 等. 水分梯度上放牧对内蒙古主要草原群落功能群多样性与生产力关系的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(7): 1649-1656
- WANG G J, WANG S P, HAO Y B, et al. Effect of grazing on the plant functional group diversity and community biomass and their relationship along a precipitation gradient in Inner Mongolia Steppe[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1649-1656
- [15] 袁建立, 江小蕾, 黄文冰, 等. 放牧季节及放牧强度对高寒草地植物多样性的影响[J]. 草业学报, 2004, 13(3): 16-21
- YUAN J L, JIANG X L, HUANG W B, et al. Effects of grazing intensity and grazing season on plant species diversity in alpine meadow[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2004, 13(3): 16-21
- [16] FETZEL T, HAVLIK P, HERRERO M, et al. Seasonality constraints to livestock grazing intensity[J]. *Global Change Biology*, 2017, 23(4): 1636-1647
- [17] SLOAT L L, GERBER J S, SAMBERG L H, et al. Increasing importance of precipitation variability on global livestock grazing lands[J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8(3): 214-218
- [18] LIANG M W, GORNISH E S. Rainfall regulation of grazed grasslands[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116(48): 23887-23888
- [19] WELLS H B M, CREGO R D, EKADELI J, et al. Less is more: Lowering cattle stocking rates enhances wild herbivore habitat use and cattle foraging efficiency[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022, 10: 825689.
- [20] EJRNE S R, DALBY L, BLADT J, et al. Opportunities and barriers for promoting biodiversity in Danish beef production[J]. *iScience*, 2024, 27(12): 111422
- [21] MESLÉARD F, YAVERCOVSKI N, LEFEBVRE G, et al. High stocking density controls *Phillyrea angustifolia* in Mediterranean grasslands[J]. *Environmental Management*, 2017, 59(3): 455-463
- [22] 聂莹莹, 陈金强, 辛晓平, 等. 呼伦贝尔草甸草原区主要植物种群生态位特征与物种多样性对封育年限响应[J]. 草业学报, 2021, 30(10): 15-25
- NIE Y Y, CHEN J Q, XIN X P, et al. Responses of niche characteristics and species diversity of main plant populations to duration of enclosure in the Hulun Buir meadow steppe[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(10): 15-25
- [23] 卫智军, 牛富宝, 刘红梅, 等. 短花针茅荒漠草原植物种群生态位对放牧的响应[J]. 中国草地学报, 2015, 37(5): 24-32
- WEI Z J, NIU F B, LIU H M, et al. Study on response of niche of *Stipa breviflora* desert steppe plant populations to grazing[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2015, 37(5): 24-32
- [24] 牛慧慧, 陈辉, 付阳, 等. 柴达木盆地东部荒漠植物生态位特征[J]. 生态学报, 2019, 39(8): 2862-2871
- NIU H H, CHEN H, FU Y, et al. Ecological niche characteristics of desert plants in the eastern Qaidam basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(8): 2862-2871
- [25] 王慧敏, 朱仲元, 张璐. 典型草原群落特征及种群生态位对土壤类型响应研究—以锡林河流域为例[J]. 生态环境学报, 2006, 15(4): 71-75

- 2019,28(12):2364-2372
- WANG H M, ZHU Z Y, ZHANG L. Effects of different soil types on community characteristics and population niche in typical grassland: Taking the Xilin River Basin as an example[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(12):2364-2372
- [26] 张金屯, 焦蓉. 关帝山神尾沟森林群落木本植物种间联结性与相关性研究[J]. 植物研究, 2003, 23(4):458-463
- ZHANG J T, JIAO R. Interspecific association between woody plants in Shenweigou of Guandi mountains, Shanxi Province[J]. Bulletin of Botanical Research, 2003, 23(4):458-463
- [27] 刘菊红, 王忠武, 郝敦元, 等. 重牧对荒漠草原主要植物种和功能群组织力的影响[J]. 中国草地学报, 2018, 40(5):85-92
- LIU J H, WANG Z W, HAO D Y, et al. Effect of heavy grazing on the organization ability of main plant species and functional groups in a desert steppe[J]. Chinese Journal of Grassland, 2018, 40(5):85-92
- [28] 吴姣姣, 向明学, 拉多, 等. 不同放牧强度对拉萨河谷温性草原主要植物生态位及种间联结的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(3):513-522
- WU J J, XIANG M X, LHA D, et al. Analysis of niche and interspecific association of dominant plant species of temperate grassland under different grazing intensities in Lhasa River valley[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(3):513-522
- [29] QU T B, GUO W Q, YANG C X, et al. Grazing by large herbivores improves soil microbial metabolic activity in a meadow steppe[J]. Grassland Science, 2021, 67(1):30-40
- [30] 陈瑜, 杨晨晨, 潮洛濛, 等. 温性草甸草原羊草功能性状对不同放牧强度的响应[J]. 草原与草坪, 2023, 43(2):143-151
- CHEN Y, YANG C C, CHAO L M, et al. Responses of functional traits to different grazing intensities in *Leymus* warm meadow steppe[J]. Grassland and Turf, 2022, 43(2):143-151
- [31] 胡向敏, 乌仁其其格, 高铁奇, 等. 放牧强度对贝加尔针茅草甸草原植物群落功能群及多样性的影响[J]. 草原与草业, 2023, 35(3):15-21
- HU X M, WUREN Q Q G, GAO T Q, et al. Effects of grazing intensity on plant community functional groups and diversity in *Baikar Stipa* meadow steppe[J]. Grassland and Prataculture, 2023, 35(3):15-21
- [32] ALTOME A I A. The effect of grazing intensity on above ground net primary production in Hulunber meadow steppe China[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Agriculture Sciences, 2021:22-25
- [33] 王森, 张宇, 李瑞强, 等. 放牧强度对羊草草甸草原植物器官及群落氮磷化学计量的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(7):1371-1384
- WANG M, ZHANG Y, LI R Q, et al. Effects of grazing disturbance on the stoichiometry of nitrogen and phosphorus in plant organs of *Leymus chinensis* meadow steppe[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(7):1371-1384
- [34] 许宏斌, 辛晓平, 宝音陶格涛, 等. 放牧对呼伦贝尔羊草草甸草原生物量分布的影响[J]. 草地学报, 2020, 28(3):768-774
- XU H B, XIN X P, BAOYIN T G T, et al. Effects of grazing on biomass distribution on the *Leymus chinensis* meadow steppe of Hulunbeier[J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(3):768-774
- [35] SHANNON C E, WEAVER W. The mathematical theory of communication [M]. Chicago: University of Illinois Press, 1949:55-58
- [36] PIANKA E R. The structure of lizard communities [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4:53-74
- [37] 赵利萌, 张卫青, 徐新影, 等. 克氏针茅草原植物群落特征与物种生态位对放牧强度的响应[J]. 中国草地学报, 2023, 45(4):11-21
- ZHAO L M, ZHANG W Q, XU X Y, et al. Responses of plant community characteristics and population niche to grazing intensity in *Stipa krylovii* grassland[J]. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(4):11-21
- [38] 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
- [39] 高军靖, 吕世海, 刘及东, 等. 不同干扰类型对呼伦贝尔草甸草原群落结构及物种多样性影响的比较[J]. 环境科学研究, 2013, 26(7):765-771
- GAO J J, LYU S H, LIU J D, et al. Comparative study on effects of different disturbances on community structure and species diversity in Hulunbuir meadow steppe [J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26(7):765-771
- [40] 杨天成, 李晓佳, 海春兴, 等. 典型草原群落物种多样性及功能群特征对不同管理方式的响应[J]. 西南农业学报, 2022, 35(9):2180-2188
- YANG T C, LI X J, HAI C X, et al. Response of species diversity and functional group characteristics of typical steppe communities to different management methods[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2022, 35(9):2180-2188
- [41] 郭振宁, 孙世贤, 张焱, 等. 放牧干扰下荒漠草原植物功能群数量特征与输沙量的关系[J]. 水土保持通报, 2024, 44(1):29-39
- GUO Z N, SUN S X, ZHANG Y, et al. Relationship between plant functional group quantitative characteristics and sand transport in desert grasslands under grazing disturbance [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1):29-39
- [42] 裴婧宏, 李江文, 韩国栋, 等. 短花针茅荒漠草原植物功能性状对载畜率的响应[J]. 中国草地学报, 2025, 47(1):27-36
- PEI J H, LI J W, HAN G D, et al. Responses of plant functional traits to stocking rate in *Stipa breviflora* desert steppe [J]. Chinese Journal of Grassland, 2025, 47(1):27-36
- [43] 王梓晗, 吕世杰, 王忠武, 等. 放牧强度对优势种群重要值和物种多样性及其二者典型关系的影响[J]. 生态环境学报, 2024, 33(6):869-876
- WANG Z H, LYU S J, WANG Z W, et al. Effects of grazing intensity on dominant population and species diversity and their

- typical relationships[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2024,33(6):869-876
- [44] 李永宏. 放牧影响下羊草草原和大针茅草原植物多样性的变化[J]. 植物学报, 1993,35(11):877-884
- LI Y H. Grazing dynamics of the species diversity in *Aneurolepidium chinensis* steppe and *Stipa grandis* steppe [J]. Acta Botanica Sinica, 1993,35(11):877-884
- [45] 邓彤彤, 李长斌, 李希来, 等. 不同放牧强度对青藏高原高寒草甸物种多样性和生物量的影响[J/OL]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1055.S.20240709.1620.002>, 2024-07-12/2025-06-27
- LI C B, LI L X, et al. Effects of different grazing intensities on species diversity and biomass of alpine meadows on the Tibetan plateau[J/OL]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1055.S.20240709.1620.002>, 2024-07-12/2025-06-27
- [46] YAN W M, ZHANG S B, YANG Y W. Effects of grazing intensity on the relationship between plant species diversity and primary productivity in an alpine meadow[J]. Pratacultural Science, 2024,41(3):539-547
- [47] 崔盛超, 图雅, 萨拉, 等. 呼伦贝尔寸草苔草原群落特征及物种多样性与土壤理化性质的关系[J]. 水土保持通报, 2023,43(5):27-34
- CUI S C, TU Y, SA L, et al. Relationship between community characteristics and species diversity of *Carex duriuscula* and soil physiochemical properties in Hulunbuir steppe [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023,43(5):27-34
- [48] GUAN H H, ZHANG S Y, HUANGPU Y F, et al. Moderate grazing promotes arthropod species diversity in an alpine meadow[J]. Biology (Basel), 2023,12(6):778
- [49] COLE D N. Experimental trampling of vegetation II. Predictors of resistance and resilience [J]. The Journal of Applied Ecology, 1995,32(1):215
- [50] 殷晶晶. 过度放牧致羊草个体矮化的光合调控机制初探[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019:32-35
- YIN J J. Preliminary study on the photosynthetic regulation mechanism of overgrazing-induced dwarf in *Leymus chinensis* [D]. Hohhot: Inner Mongolia: Inner Mongolia University, 2019:32-35
- [51] 余轩, 王兴, 吴婷, 等. 荒漠草原植物多样性恢复与土壤生境的关系[J]. 生态学报, 2021,41(21):8516-8524
- YU X, WANG X, WU T, et al. Relationship between restoration of plant diversity and soil habitat in desert steppe[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(21):8516-8524
- [52] PULUNGAN M A, SUZUKI S, GAVINA M K A, et al. Grazing enhances species diversity in grassland communities [J]. Scientific Reports, 2019,9:11201
- [53] 聂莹莹, 徐丽君, 辛晓平, 等. 围栏封育对温性草甸草原植物群落构成及生态位特征的影响[J]. 草业学报, 2020,29(11):11-22
- NIE Y Y, XU L J, XIN X P, et al. Effects of fence enclosure on the plant community composition and niche characteristics in a temperate meadow steppe[J]. Acta Pratacultural Sinica, 2020,29(11):11-22
- [54] LI Z L, QIN W H, ZHOU S B, et al. Study on plant niche under fencing measures in the semiarid grassland and of north China[J]. Acta Agrestia Sinica, 2014,22(6):1186-1193
- [55] 高斌. 呼伦贝尔草甸草原冷蒿的化感物质含量及作用机制研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020:22-26
- GAO B. Study on allelochemicals content and functional mechanism of *Artemisia frigida* in meadow steppe of HulunBuir [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020:22-26
- [56] 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
- [57] 杨晨晨, 陈宽, 周延林, 等. 放牧对锡林郭勒草甸草原群落特征及生产力的影响[J]. 中国草地学报, 2021,43(5):58-66
- YANG C C, CHEN K, ZHOU Y L, et al. Effects of grazing on community characteristics and productivity of Xilingol meadow steppe[J]. Chinese Journal of Grassland, 2021,43(5):58-66
- [58] 王琪, 郑佳华, 张峰, 等. 放牧强度对短花针茅荒漠草原植物种群生态位的影响[J]. 中国草地学报, 2022,44(10):1-9
- WANG Q, ZHENG J H, ZHANG F, et al. Effects of grazing intensity on the ecological niche of plant population in *Stipa breviflora* desert steppe [J]. Chinese Journal of Grassland, 2022,44(10):1-9
- [59] 高成芬, 张德罡, 王国栋. 不同强度短期放牧对高寒草甸植被特征的影响[J]. 草原与草坪, 2021,41(5):9-15
- GAO C F, ZHANG D G, WANG G D. Effects of different intensities of short-term grazing on vegetation characteristics of alpine meadow[J]. Grassland and Turf, 2021,41(5):9-15

(责任编辑 闵芝智)