

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.03.024

引用格式:米雨晴,许宏斌,张雷,等.围封对内蒙古荒漠草原植被生态位及种间联结性的影响[J].草地学报,2026,34(3):1007—1016

MI Yu-qing, XU Hong-bin, ZHANG Lei, et al. The Impact of Enclosure on Vegetation Ecological Niche and Interspecific Associations in Inner Mongolian Desert Steppe[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(3):1007—1016

围封对内蒙古荒漠草原植被生态位及种间联结性的影响

米雨晴^{1,2}, 许宏斌^{1*}, 张雷¹, 唐月坤³, 敖胡日查¹, 温都日根⁴, 李艾兰⁵

(1. 内蒙古自治区林业科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010010; 2. 内蒙古大学生态与环境学院, 内蒙古 呼和浩特 010021; 3. 通辽市森林公园管护中心, 内蒙古 通辽 028000; 4. 正蓝旗草原工作站, 内蒙古 锡林郭勒 027200; 5. 商都县农牧业技术推广中心, 内蒙古 乌兰察布 013450)

摘要:为评估长期围封对内蒙古荒漠草原植物群落物种多样性、物种生态位特征及种间联结性的影响,以揭示其作为生态恢复措施的有效性,及群落演替状态,本研究以围封22年的荒漠草原植被为研究对象,对比分析了围封样地与对照样地的差异。主要结果表明:围封处理下,植物群落物种数、Margalef多样性指数、Shannon-Wiener多样性指数、Simpson丰富度指数和Pielou均匀度指数均显著增加;多年生草本的重要值和生态位宽度显著增加,而柽叶蒿(*Neopallasia pectinata*)等退化指示性物种的重要值和生态位宽度显著降低。生态位重叠值大于0.2和0.5的植物物种对均有不同程度增加。基于Pearson相关系数、种间关联系数AC检验和Spearman秩相关检验的种间联结性分析表明,围封样地植物群落总体联结性呈不显著负相关关系且种间联结性较弱。综上,长期围封显著增加了荒漠草原植物多样性,优化了物种组成并提高了植物对环境资源的利用效率。然而,群落种间关联性弱且总体联结性呈不显著负相关,表明围封22年后群落仍处于不稳定的演替阶段,其长期稳定性和恢复效果需进一步关注。

关键词:荒漠草原;围封;重要值;生态位;种间联结性

中图分类号:S812

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)03-1007-10

The Impact of Enclosure on Vegetation Ecological Niche and Interspecific Associations in Inner Mongolian Desert Steppe

MI Yu-qing^{1,2}, XU Hong-bin^{1*}, ZHANG Lei¹, TANG Yue-kun³, AO Hu-richa¹, WEN Du-rigen⁴, LI Ai-lan⁵

(1. Inner Mongolia Academy of Forestry Sciences, Hohhot, Inner Mongolia 010010, China; 2. College of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot, Inner Mongolia 010021, China; 3. Tongliao Forest Park Management Center, Tongliao, Inner Mongolia 028000, China; 4. Grassland Workstation of Zhenglan Banner, Xilingol, Inner Mongolia 027200, China; 5. Agricultural and Animal Husbandry Technology Extension Center of Shangdu County, Ulanqab, Inner Mongolia 013450, China)

Abstract: In order to reveal its effectiveness as an ecological restoration measure and the state of community succession, this study took the vegetation of a desert steppe in Inner Mongolia enclosed for 22 years as the research object. And the effect differences of long-term enclosure on plant community species diversity, species niche characteristics, and interspecific associations were compared and analyzed between the enclosed site and the control site. The main results showed that under the enclosure treatment, the number of plant community species, the Margalef diversity index, the Shannon-Wiener diversity index, the Simpson richness index, and the Pielou evenness index all increased significantly. The important value and niche breadth of perennial herbs increased

收稿日期:2025-05-08;修回日期:2025-07-18

基金项目:内蒙古自治区“揭榜挂帅”项目(2024JBGS0020);内蒙古自治区林业科学研究院科研能力提升“揭榜挂帅”项目(2024NLTS03);内蒙古自治区种业科技创新重大示范工程“揭榜挂帅”项目专题“乡土草良种推广与应用”(2022JBGS0040402)资助

作者简介:米雨晴(2001-),女,汉族,河北保定人,硕士研究生,主要从事生态环境工程方面的研究,E-mail:muyuqing2023@163.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail:xhb1686@163.com

significantly, while the important value and niche breadth of degradation indicator species such as *Neopallasia pectinata* decreased significantly. The number of plant species pairs with niche overlap values greater than 0.2 and 0.5 increased to varying degrees. Interspecific association analysis based on the Pearson correlation coefficient, the interspecific association coefficient AC test, and the Spearman rank correlation test indicated that the overall interspecific association in the plant community of the enclosed site showed a non-significant negative correlation and the interspecific associations were weak. In conclusion, long-term enclosure significantly increased plant diversity in the desert steppe, optimized species composition, and improved plant utilization efficiency of environmental resources. However, the weak interspecific associations and the non-significant negative overall correlation indicate that the community is still in an unstable successional stage after 22 years of enclosure, and its long-term stability and restoration effectiveness require further attention.

Key words: Desert steppe; Enclosure; Important values; Ecological niche; Interspecific associations

在草地生态系统中,植物对有限资源的竞争是维持生物多样性的主要压力,长期的竞争等生态过程作用驱动生态位变化和种间联结演变^[1]。植物生态位和种间联结用于描述各种群之间的竞争关系以及群落中优势种的地位,表示植物对环境适应能力和资源利用能力的大小^[2]。生态位可分为生态位宽度和生态位重叠^[3],其中生态位宽度能够量化描述种间关系^[4],生态位重叠则反映各物种在资源利用上的潜力和效率^[5]。种间联结性是指不同物种在空间分布上的相互关联性,是群落结构形成和演替的基础^[6]。正联结体现了植物利用资源的相似性和生态位重叠性^[7];负联结则源于物种之间激烈的资源竞争以及通过物理或化学方式相互影响和排斥^[8-9]。

荒漠草原是草原向荒漠过渡的一类草原^[10],内蒙古荒漠草原植被表现出物种组成简单、植物功能群丰富、群落盖度和生产力低以及抗干扰能力弱的特点^[11]。围封作为退化草地修复的关键措施,通过消除放牧干扰重新分配资源格局,进而调控植物种间关系^[12-13]。李中林等^[14]、赵丽娅等^[15]的研究结果表明围栏封育区的植物生态位宽度要高于自由放牧区的生态位宽度,群落总体呈显著正联结,而刘嘉怡等^[16]研究表明随着围封年限的增加,优势种总体联结性由正转负,且多数呈不显著。

目前对于围封的研究主要集中在物种多样性及群落特征方面,石宗维等^[17]、周天阳等^[18]研究均表明,围封会显著提高样地植物生物量。刘欢等^[19]、马娅杰等^[20]在研究中发现,随着禁牧时间的增加,多样性指数整体上呈现出先上升后下降的趋势,这些结果共同表明围封驱动了群落建群种的演替。荒漠草原植物群落生态位和种间联结也有部分研究^[21-23],但是对于长期围封下荒漠草原生态位和种间联结的研究尚少。本文旨在通过研究围封22年植物群落生态位及种间关联的差异,阐明长期围封对内蒙古荒漠

草原生态系统物种生态位变化的影响,揭示物种间联结关系及群落结构变化特征,以期对荒漠草原的科学化管理和生态修复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区锡林郭勒盟苏尼特右旗(112°43'27" E, 42°48'04" N),属于中温带亚干旱大陆性季风气候。年平均气温4.3℃,年平均降水量215 mm。主要植被类型有干草原植被、荒漠化草原植被及草原化荒漠植被,试验区的草原类型为短花针茅荒漠草原,植被低矮稀疏,植物群落结构简单,种类组成比较贫乏。植物建群种为短花针茅(*Stipa breviflora*),优势种为无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)和碱韭(*Allium polyrhizum*),退化指示种为银灰旋花(*Convolvulus ammannii*),偶见有狭叶锦鸡儿(*Caragana stenophylla*)^[24]。

1.2 试验设计

试验始于2000年,设置围封样地和对照样地,样地地势平坦且在进行围栏封育之前均受自由放牧的影响。围封样地面积约1 hm²,在外围用铁丝网及水泥桩设置围栏,围栏内全年禁牧;在距围栏样地5 m选取受干扰程度、土壤条件、气候条件基本相似的平行坡面作为对照样地,自由放牧草地不设置任何保护措施,全年载畜率为1.25 羊单位·hm⁻²。截至2022年,围封处理已禁牧22年^[25]。

1.3 样地调查

于2022年8月对各样地进行植被调查和样品采集。在对照样地选择一块能代表研究区域内荒漠草原种群特征的样地,其面积为100 m×100 m,

在围封样地与对照样地内,分别随机设置12个1 m×1 m的草本样方,总共24个样方,记录样地植物种类、株数、密度、高度等信息。齐地面刈割样方内所有植株的地上部分,分种装入纸袋内,在65℃恒温下烘干至恒重,测量干重并记录生物量。

1.4 计算公式

1.4.1 物种重要值计算^[26]

物种重要值=(相对高度+相对密度+相对生物量)/3 (1)

1.4.2 物种多样性指数计算^[27]

Shannon-Wiener 物种多样性指数(H):

$$H = -\sum P_i \ln P_i \quad (2)$$

Simpson 物种优势度指数(D):

$$D = 1 - \sum P_i^2 \quad (3)$$

Pielou 物种均匀度指数(J):

$$J = H / \ln S \quad (4)$$

Margalef 物种丰富度指数(M):

$$M = (S - 1) / \ln N \quad (5)$$

式中, S 表示样方内物种总数量, P_i 是第*i*个种群中的个体数目, $P_i = N_i / N$,其中, N 是样方中所有物种个体的总数量, N_i 是指在总个体数*N*中所占的比重。

1.4.3 生态位宽度计算 生态位宽度的计算采用Levins 公式^[28]:

$$B_i = 1 / \sum_{j=1}^r (P_{ij})^2 \quad (6)$$

式中, B_i 是物种*i*的生态位宽度, r 为划分的资源状态数量, $P_{ij} = n_{ij} / N_{ij}$ 为物种*i*在第*j*个资源状态上的重要值占该物种所有资源状态重要值总和的比例。

1.4.4 生态位重叠计算 生态位重叠指数采用Pianka生态位重叠公式计算:

$$O_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^r P_{ij} P_{kj}}{\sqrt{\sum_{j=1}^r (P_{ij})^2 \sum_{j=1}^r (P_{kj})^2}} \quad (7)$$

式中, O_{ik} 为物种*i*与物种*k*的生态位重叠指数。

1.4.5 总体联结性检验计算

$$V_R = \frac{S_T^2}{\sigma_T^2} = \frac{\sum_{i=1}^s P_i (1 - P_i)}{(1/N) \sum_{i=1}^N (T_j - t)^2} \quad (8)$$

$$W = V_R \times N \quad (9)$$

式中, $P_i = n_i / N$, P_i 为物种*i*的出现频度, n_i 为物种*i*出现的样方数; N 为样方总数; S 为物种总数; T_j 为样方*j*内的物种总数; t 为所有样方的平均物种

数; S_T^2 为所有样方的物种数方差; σ_T^2 为所有物种出现频度的方差。

若 $V_R = 1$,表示物种总体间无联结; $V_R > 1$,表示种间总体联结性为正联结; $V_R < 1$,表示种间总体联结性为负联结。采用统计量 $W = N \times V_R$ 来检验 V_R 值偏离1的显著程度,若物种间总体关联不显著,则 W 值落入 χ^2 分布的90%置信区间: $\chi^2(0.95, N) < W < \chi^2(0.05, N)$,否则,总体关联显著($P < 0.05$)^[29]。

1.4.6 种间联结性检验 种间关联性是定性分析,而种间相关性是定量方法^[30]。本文种间联结性以Yates连续校正公式纠正的 χ^2 统计量进行定性研究,结合种间关联系数AC检验、Spearman秩相关检验和Pearson相关系数进行定性定量相结合分析不同物种对之间的种间关系^[31]。

(1)采用Yates连续校正公式计算 χ^2 值,计算公式如下^[32]:

$$\chi^2 = \frac{N(|ad - bc| - 0.5N)^2}{(a+b)(a+c)(c+d)(b+d)} \quad (10)$$

(2)种间联结系数AC计算公式如下:

$$\text{当 } ad \geq bc \text{ 时, } AC = \frac{ad - bc}{(a+b)(b+d)} \quad (11)$$

$$\text{当 } bc > ad \text{ 及 } d \geq a \text{ 时, } AC = \frac{ad - bc}{(a+b)(a+c)} \quad (12)$$

$$\text{当 } bc > ad \text{ 及 } d < a \text{ 时, } AC = \frac{ad - bc}{(c+d)(b+d)} \quad (13)$$

式中, N 为总样方数; a 为两物种同时出现的样方数; b 、 c 为有1个物种出现的样方数; d 表示两物种均未出现的样方数。

(3)Pearson秩相关系数计算公式如下^[33]:

$$r_s(i, j) = \frac{\sum_{k=1}^N (x_{ik} - \bar{x}_i)(x_{jk} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^N (x_{ik} - \bar{x}_i)^2 \sum_{k=1}^N (x_{jk} - \bar{x}_j)^2}} \quad (14)$$

式中: x_{ik} 和 x_{jk} 分别是种*i*和种*j*在样方*k*中的多度值; $\bar{x}_i$ 和 $\bar{x}_j$ 分别是种*i*和种*j*在所有样方中多度的平均值。

(4)Spearman秩相关系数计算公式如下:

$$r_p(i, j) = 1 - \frac{6 \sum_{k=1}^N (x_{ik} - x_{jk})^2}{N^3 - N} \quad (15)$$

本研究采用Microsoft Excel 2019软件对数据进行处理,在IBM SPSS Statistics 22软件中对数据进行单因素方差检验。在R 4.3.3软件中使用“spaa”程序包对生态位和种间联结性进行计算,绘图在R 4.3.3软件中进行,数据使用平均值±标准误表示。

2 结果与分析

2.1 围封对物种多样性的影响

围封对物种多样性的提高效果显著(图1)。

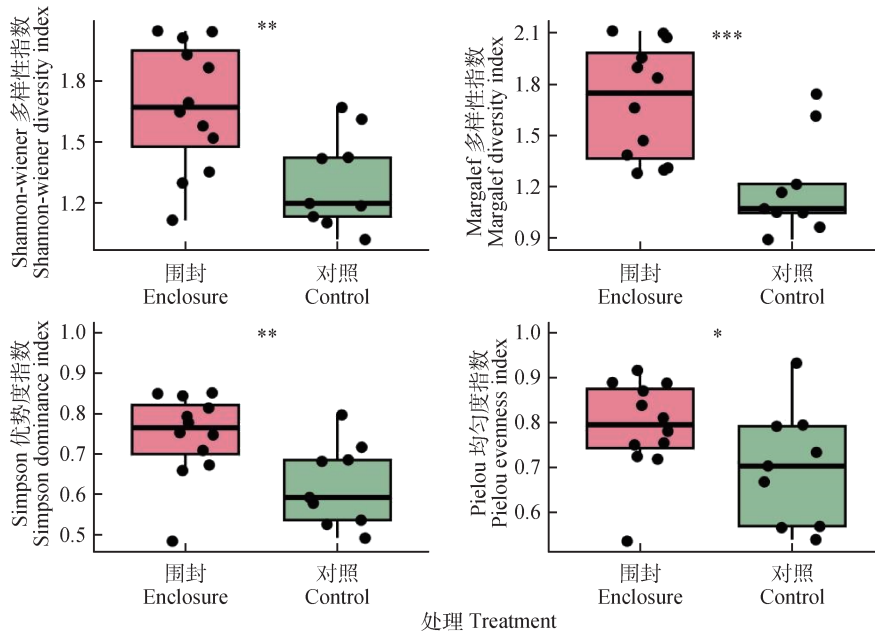


图1 围封对植被物种多样性指数的影响

Fig. 1 Effects of enclosure on vegetation species diversity index

注:ns表示在0.05水平无显著差异,*表示在0.05水平有显著差异($P < 0.05$),**表示在0.01水平有极显著差异($P < 0.01$),***表示在0.001水平有极显著差异($P < 0.001$)。下同

Note: ns, no significant difference at the 0.05 level, *, significant difference at 0.05 level ($P < 0.05$), **, significant difference at 0.01 level ($P < 0.01$), ***, significant difference at 0.001 ($P < 0.001$). The same as below

2.2 围封对重要值和生态位宽度及重叠的影响

统计调查样地共出现19个物种(表1),其中围封样地出现17个物种,对对照样地出现11个物种,物种生活型以多年生草本和一二年生草本为主。围封22年无芒隐子草(*Cleistogenes songorica*)重要值最大,画眉草(*Eragrostis pilosa*)和碱韭(*Allium polyrhizum*)次之。对对照样地栉叶蒿重要值最大,短花针茅(*Stipa breviflora*)和碱韭次之,表明围封22年后,样地起主导作用的优势物种发生变化。

在围封样地中,无芒隐子草(9.06)生态位宽度较大,表明围封22年,无芒隐子草在其群落中竞争能力强于其他物种。对对照样地中生态位宽度较大的物种为短花针茅(8.75),表明短花针茅在对照样地植物群落中资源竞争能力较强。

由图2可知,围封样地生态位重叠值分布范围为[0, 0.88],重叠指数最高的为无芒隐子草和碱韭;对对照样地生态位重叠值分布范围为[0, 0.97],

具体来看,围封22年Pielou均匀度指数显著增加($P < 0.05$),Margalef多样性指数、Shannon-Wiener多样性指数和Simpson优势度指数极显著增加($P < 0.01$)。

银灰旋花和栉叶蒿的生态位重叠指数最高。围封22年后生态位重叠指数大于等于0.5的有35对,相较于对照样地多13对;生态位重叠指数在(0.2, 0.49]的有41对,相较于对照样地多13对。这表明长期围封会显著提高不同物种对同一资源的利用与竞争状况,使资源利用更加充分。

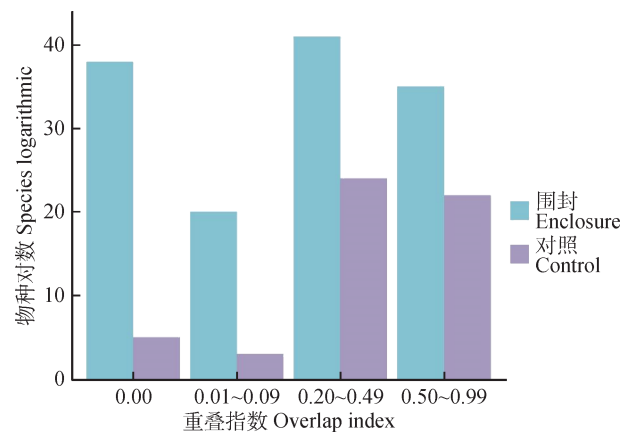


图2 围封对生态位重叠的影响

Fig. 2 Effect of enclosure on niche overlap

表 1 围封对物种重要值和生态位宽度的影响

Table 1 Effects of enclosure on species importance and niche width

物种 Species	拉丁学名 Latin name	生活型 Life type	重要值 Important/%		生态位宽度 Niche width	
			围封 Enclosure	对照 Control	围封 Enclosure	对照 Control
无芒隐子草	<i>Cleistogenes songorica</i>	多年生 Perennial	28.34±0.16	11.49±0.11	9.06	6.45
碱韭	<i>Allium polyrhizum</i>		9.42±0.08	11.91±0.12	8.11	7.67
短花针茅	<i>Stipa breviflora</i>		7.90±0.03	12.12±0.08	7.70	8.75
银灰旋花	<i>Convolvulus ammannii</i>		8.30±0.03	10.95±0.06	7.60	7.73
寸草	<i>Carex duriuscula</i>		6.61±0.04	2.39±0.01	5.69	1.97
细叶韭	<i>Allium tenuissimum</i>		3.02±0.33	1.86±0.00	3.38	1.98
糙隐子草	<i>Cleistogenes squarrosa</i>		3.15±0.24	—	1.98	—
细叶苔	<i>Carex duriuscula</i>		1.38±0.01	—	2.65	—
鸦葱	<i>Takhtajaniantha austriaca</i>		1.35±0.01	—	1.00	—
乳白黄芪	<i>Astragalus galactites</i>		—	0.81±0.01	—	1.96
野韭	<i>Allium ramosum</i>	一二年生 Born in the first and second years	0.72±0.00	—	8.11	—
老鹳草	<i>Geranium wilfordii</i>		0.55±0.01	—	1.47	—
栉叶蒿	<i>Neopallasia pectinata</i>		3.54±0.14	39.73±0.25	4.34	7.71
画眉草	<i>Eragrostis pilosa</i>		12.54±0.16	—	6.11	—
猪毛菜	<i>Kali collinum</i>		1.99±0.02	0.86±0.01	3.56	1.85
鹤虱	<i>Lappula myosotis</i>		1.09±0.01	—	2.00	—
狗尾草	<i>Setaria viridis</i>		0.74±0.00	—	1.00	—
狭叶锦鸡儿	<i>Caragana stenophylla</i>	灌木 Shrub	9.36±0.11	7.06±0.06	6.63	6.04
木地肤	<i>Bassia prostrata</i>		—	0.81±0.00	—	1.00

2.3 围封对总体联结性及种间联结性的影响

根据表 2 结果,围封样地 $VR=0.93<1$,群落物种种群间呈负联结,检验统计量 W 为 11.17,根据卡方临界值表, $n=12$ 时卡方临界值介于 5.23~21.03, W 落入卡方临界值范围,说明 17 个物种总体

呈不显著负联结。对照样地 $VR=1.17>1$,群落物种种群间呈正联结,检验统计量 W 为 10.53,根据卡方临界值表, $n=9$ 时卡方临界值介于 3.33~16.92, W 未落入卡方临界值范围,说明 11 个物种总体呈不显著正联结。

表 2 围封对总体联结性的影响

Table 2 Effects of enclosure on overall connectivity

检验统计量 W	总体联结系数 VR	卡方临界值 $\chi^2(0.95,N)$	卡方临界值 $\chi^2(0.05,N)$	检验结果 Result	样地 Plots
11.17	0.93	5.23	21.03	不显著 负相关	围封 Enclosure
10.53	1.17	3.33	16.92	不显著 正相关	对照 Control

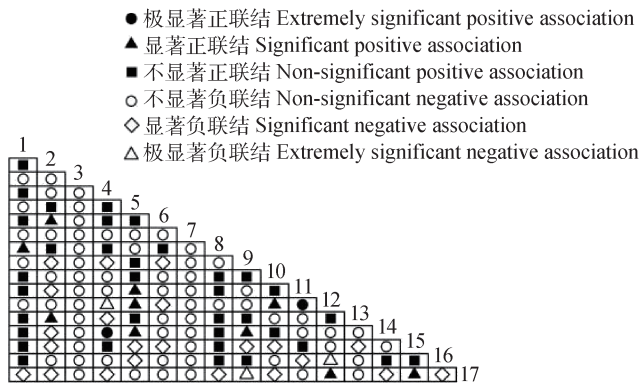
从 Yates 矫正的检验公式结果(图 3)可知,围封 22 年后,样地 136 个物种对中,正联结种对有 47 个,不显著正联结种对占 35 对;负联结种对有 89 对,不显著负联结种对占 64 对。对照样地 55 个物种对中,正联结种对有 44 个,不显著正联结种对占 28 对;负联结种对有 11 对,不显著负联结种对占 6 对。表明围封样地与对照样地都表现为物种间关联松散,独立性较强。

由种间关联系数 AC 网络图可知(图 4),围封样地分别有 31 个强正联结物种对($AC\geq 0.5$)和 37 个强负联结物种对($AC<-0.5$),对照样地有 12 个强正联结物种对和 10 个强负联结物种对;AC 位于 $[0.25,0.5)$ 和 $[-0.25,0.25)$ 区间时,说明物种对

是较强的正联结物种对和较强负联结物种对,其中围封样地分别有 2 对和 8 对,对照样地分别有 4 对和 2 对;当 AC 位于 $[-0.25,0.25)$ 区间时,表现为弱联结性,围封样地和对照样地分别有 58 和 27 个物种对。表明不显著联结物种对数量占大部分,与 χ^2 检验统计量检验结果相互验证。

由 Spearman 秩相关结果可知(图 5),围封样地正关联种对有 56 个,较对照组多 32 对;负关联种对有 80 个,相比对照组多 49 对,其中围封样地不显著正联结和不显著负关联分别占总对数的 30.14%、58.09%;对照样地不显著正联结和不显著负关联分别占总对数的 41.82%、54.54%。与 χ^2 检验统计量检验和种间关联系数 AC 结果一致。

(a) 围封 Enclosure



(b) 对照 Control

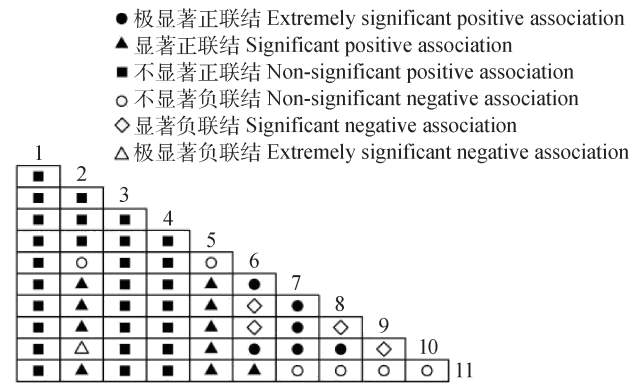
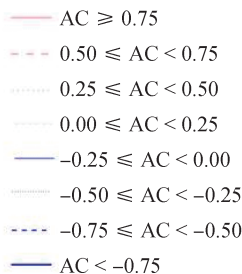
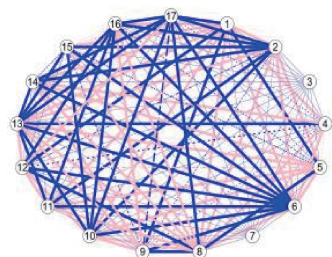
图3 草本 χ^2 检验统计量检验半矩阵图

Fig. 3 Semimatrix diagram of statistic test for herbal test

注:(a)围封中,1为短花针茅;2为糙隐子草;3为无芒隐子草;4为栉叶蒿;5为画眉草;6为狗尾草;7为碱韭;8为银灰旋花;9为狭叶锦鸡儿;10为老鹳草;11为猪毛菜;12为寸草;13为野韭;14为细叶苔;15为细叶韭;16为鸭葱;17为鹤虱,下同。(b)对照中,1为短花针茅;2为无芒隐子草;3为栉叶蒿;4为碱韭;5为银灰旋花;6为狭叶锦鸡儿;7为猪毛菜;8为寸草;9为细叶韭;10为黄芪;11为木地肤,下同

Note: (a) In the Figure A, 1=Stipa breviflora; 2=Cleistogenes squarrosa; 3=Cleistogenes songorica; 4=Neopallasia pectinata; 5=Eragrostis pilosa; 6=Setaria viridis; 7=Allium polyrhizum; 8=Convolvulus ammannii; 9=Caragana stenophylla; 10=Geranium wilfordii; 11=Kali collinum; 12=Carex duriuscula; 13=Allium ramosum; 14=Carex duriuscula; 15=Allium tenuissimum; 16=Takhtajianantha austriaca; 17=Lappula myosotis. (b) In the Figure B, 1=Stipa breviflora; 2=Cleistogenes songorica; 3=Neopallasia pectinata; 4=Allium polyrhizum; 5=Convolvulus ammannii; 6=Caragana stenophylla; 7=Kali collinum; 8=Carex duriuscula; 9=Allium tenuissimum; 10=Astragalus galactites; 11=Bassia prostrata. The same as below

(a) 围封 Enclosure



(b) 对照 Control

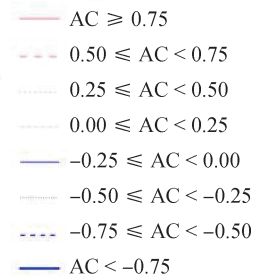
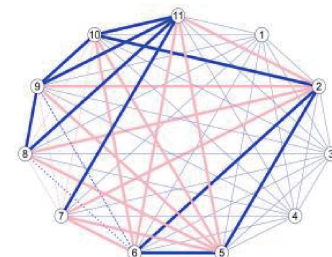
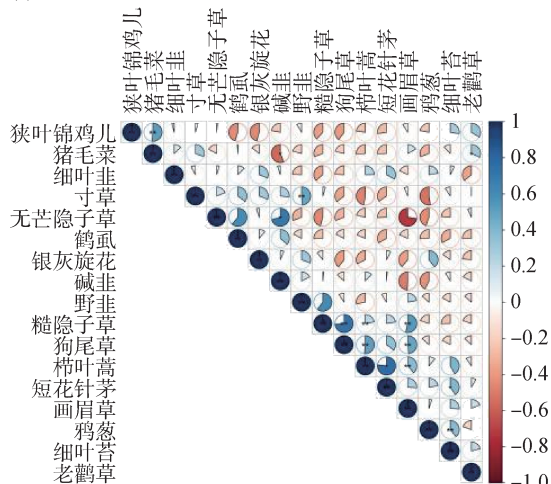


图4 草本植物种间联结系数AC网络图

Fig. 4 AC network diagram of interspecific association coefficients of herbaceous plants

(a) 围封 Enclosure



(b) 对照 Control

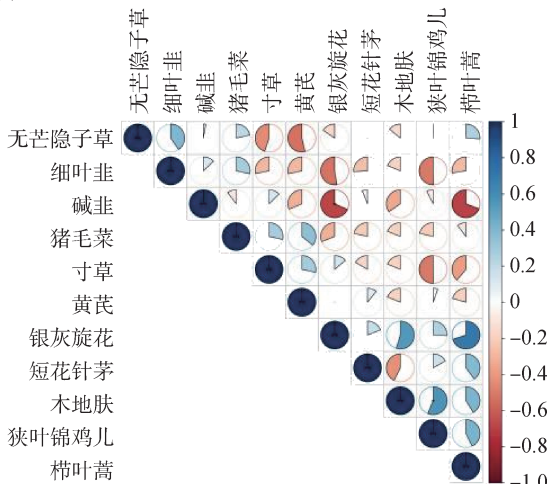


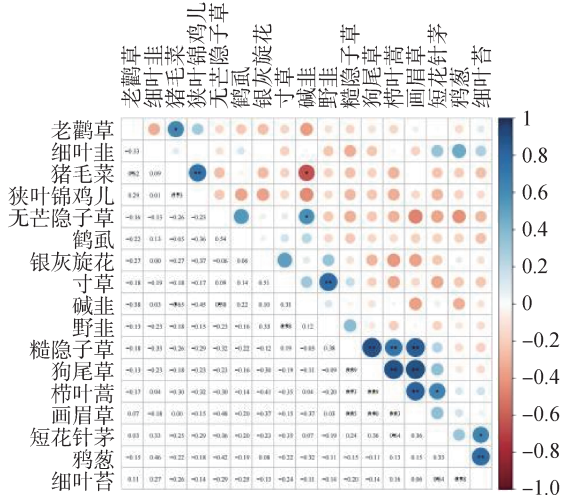
图5 植物种间联结系数Spearman秩相关系数图

Fig. 5 Spearman rank correlation coefficient diagram of association coefficient among native species in the enclosure

Pearson 相关系数如图 6 所示,围封样地呈正联结的物种对有 49 个,呈负联结物种对有 87 个,其中呈不显著正联结和不显著负联结分别有 36 和 86 个物种对;对照样地呈正联结的物种对有 22 个,呈负

联结有 33 个物种对,其中呈不显著正联结和不显著负联结的分别有 21 和 32 个物种对。4 种检验方法具有一致性,均表明样地物种对间联结性较差,空间分布呈一定的独立性。

(a) 围封 Enclosure



(b) 对照 Control

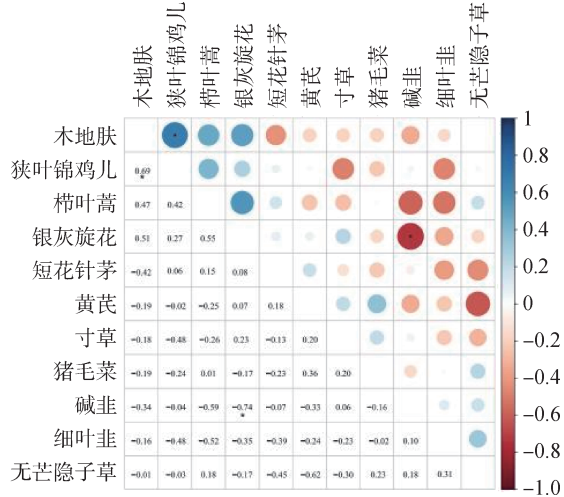


图 6 植物种间联结系数 Pearson 相关系数图

Fig. 6 Pearson correlation coefficient plot of plant interspecific association coefficients

3 讨论

3.1 围封对物种多样性的影响

物种多样性是衡量群落结构与功能稳定性的关键指标,不仅能反映群落动态变化,还能体现生物群落和生态系统的复杂性特征^[34]。在本研究中,围封 22 年后的生物多样性指数与对照样地相比显著提高,这与吴建波等^[35]的研究结果一致。主要原因在于:围封措施解除放牧干扰胁迫后,群落中物种通过提升光能竞争和水分利用效率,显著提高了 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数和 Margalef 丰富度指数。其次,长期围封形成的枯枝落叶积累,对植被更新及幼苗生长有一定的物理抑制作用,延缓了草原植被的生殖更新过程,从而使 Pielou 均匀度指数显著高于对照样地^[25]。

3.2 围封对物种的重要值和生态位的影响

重要值和生态位均是表示物种在群落中功能角色与竞争优势的指标^[32]。生态位宽度反映物种对环境资源的利用能力及其生态适应能力^[36]。研究表明,重要值高的物种通常在群落中占据主导地位,意味着它们能更广泛或更有效地利用资源,因此生态位宽度较大^[37]。陈龙涛等^[38]对山西陵川县境内野生南方红豆杉群落的样地调查发现,重要值

较大的建群种和优势种,其生态位宽度也显著较高,进一步佐证了此结论。本研究中,围封与对照样地优势物种的重要值与生态位宽度变化趋势一致,符合这一普遍规律。

除此之外,围封 22 年后无芒隐子草、碱韭等重要值和生态位宽度较大,而对照样地短花针茅、银灰旋花、栉叶蒿等重要值和生态位宽度较大,分析原因,主要可能为无芒隐子草、碱韭等物种对抗干扰能力较弱,对外界环境耐受能力较低,这与卫智军等^[39]在荒漠草原研究中发现的放牧条件下碱韭对资源利用能力下降的结果相似。其次,在对照样地,栉叶蒿等作为退化草地的指示性物种,表现出较大的生态位宽度;这一结果与王琪等^[40]在荒漠草原进行放牧强度对植物种群生态位影响研究中的发现一致,表明自由放牧对荒漠草原有一定的退化作用。

生态位重叠指数是指在同时空生存的两个或多个物种,互利共生或竞争资源的现象^[41]。本研究发现,无芒隐子草和狭叶锦鸡儿这一物种对在围封样地的生态位重叠指数较高,说明无芒隐子草和狭叶锦鸡儿对同等资源的利用程度较高。主要原因可能是狭叶锦鸡儿根系发达,促进其生长和繁殖,狭叶锦鸡儿属于灌木,植株较大,会与无芒隐子草等竞争阳光、水分等资源,致使其生态重叠指数

较大^[42]。相较于对照样地,围封22年样地生态位重叠指数大于0.5和0.2的物种对数量都有显著提高,其原因在于围封后,群落结构更复杂。生物量更多,导致对有限资源的竞争加剧,从而表现为生态位重叠指数升高^[43],此结果与聂莹莹等^[44]在退化草地实施围封所得结果一致。

3.3 围封对物种总体联结性及种间联结性特征的影响

种间联结性体现了环境对物种的选择以及物种之间的相互关系,反映了群落的动态变化,揭示了群落的稳定性^[45]。董乙强等^[46]研究指出围栏封育后,草地群落的种间关系一定会发生变化。本研究发现,围封措施下样地总体关联性为负相关,表明植被处于演替的不稳定阶段,这与它们对资源竞争激烈及种间关联弱有关:首先,围封增加样地物种多样性,物种间竞争强度增大^[47];其次,荒漠草原水分条件不足,围封消除放牧干扰后生物量增加,水分需求上升导致竞争程度加剧。对照样地由于人类活动等干扰影响植物种群的生长,植物种群为抵御放牧干扰,在演替过程中形成了协同促进作用^[23]。

本研究结果表明,不显著正相关与不显著负相关的物种对数在围封样地和对照样地都占较大比例,总体联结性均呈现不显著,表明无论是围封样地还是对照样地植物群落均较为松散,群落组成结构稳定性较差。这与李潮等^[22]结果具有一致性,主要原因在于本研究区域位于荒漠草原,植物种群旱生化明显,导致种间关联性较弱、群落处于不稳定性演替的过程之中^[48]。吴艳玲等^[21]研究结果显示,不同放牧处理下,种间关联性均不显著,进一步说明荒漠草原种间关联性较弱。

4 结论

内蒙古荒漠草原围封22年后,群落生物多样性指数显著增加,多年生草本的重要值和生态位宽度增加,栉叶蒿等退化指示性物种的重要值和生态位宽度降低,围封22年生态位重叠值较高的物种对有增加且总体联结性呈现不显著负相关。种间联结性采用多维度统计检验共同证实围封22年呈不显著负关联的种对数增加,且各方法结果均具有一致性。综上可知,围封提高了植物对资源的利用效率,但种间关联性较弱,群落仍处于不稳定的演替阶段。

参考文献

- [1] 熊梅,安海波,赵萌莉,等. 放牧对荒漠草原主要植物种群空间格局与生态位的影响[J]. 草地学报,2024,32(4):1177-1183
XIONG M, AN H B, ZHAO M L, et al. Effects of grazing on the spatial pattern and niche of main plant populations in desert steppe[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(4): 1177-1183
- [2] 陈倩,陈杰,钟娇娇,等. 秦岭山地油松天然次生林灌木层主要种群间联结性与功能群划分[J]. 应用生态学报,2018,29(6):1736-1744
CHEN Q, CHEN J, ZHONG J J, et al. Interspecific association and functional group classification of main populations in shrub layer of *Pinus tabulaeformis* natural secondary forest in Qinling Mountains, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(6): 1736-1744
- [3] 张盟,郑俊鸣,万佳艺,等. 福建省东门屿优势木本植物的生态位与种间联结[J]. 森林与环境学报,2022,42(1):11-19
ZHANG M, ZHENG J M, WAN J Y, et al. Niche and interspecific association of dominant woody plants in Dongmen Island, Fujian Province[J]. Journal of Forest and Environment, 2022, 42(1): 11-19
- [4] 肖以华,付志高,许涵,等. 广东大峡谷常绿阔叶林主要植物种间关系、生态位及其群落稳定性研究[J]. 热带亚热带植物学报,2024,32(6):695-704
XIAO Y H, FU Z G, XU H, et al. Interspecific relationships, niches and community stability of main plants in evergreen broad-leaved forest of Guangdong Grand Canyon[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2024, 32(6): 695-704
- [5] 唐颖,齐实,张林,等. 不同类型侧柏人工林下优势草本生态位及种间关系研究[J]. 草地学报,2024,32(1):261-274
TANG Y, QI S, ZHANG L, et al. Study on the niche and interspecific relationships of dominant herbs under different types of *Platycladus orientalis* plantations [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(1): 261-274
- [6] SU S J, LIU J F, HE Z S, et al. Ecological species groups and interspecific association of dominant tree species in Daiyun Mountain National Nature Reserve [J]. Journal of Mountain Science, 2015, 12(3): 637-646
- [7] 龚容,高琼,王亚林. 围封对温带半干旱典型草原群落种间关联的影响[J]. 植物生态学报,2016,40(6):554-563
GONG R, GAO Q, WANG Y L. Effects of enclosure on interspecific associations of communities in a temperate typical steppe with semi-arid climate [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(6): 554-563
- [8] 王如,彭文成,杨佳,等. 尖峰岭杉木人工林群落主要木本植物的生态位和种间联结[J]. 应用生态学报,2024,35(6):1483-1491
WANG R, PENG W C, YANG J, et al. Niche and interspecific association of main woody plants in *Cunninghamia lanceolata* plantation community in Jianfengling, Hainan, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(6): 1483-1491
- [9] 李新荣. 俄罗斯平原针阔混交林群落的灌木层植物种间相关研究[J]. 生态学报,1999,19(1):57-62
LI X R. Interspecific correlation of shrub layer plants in coniferous-broadleaved mixed forest community in Russian Plain [J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(1): 57-62

- [10] 许宏斌,苏艳龙,张雷,等. 围封10年对荒漠草原群落物种多样性与优势种空间分布格局的影响[J]. 生态学报,2024,44(10):4334-4341
XU H B, SU Y L, ZHANG L, et al. Effects of 10-year enclosure on species diversity and spatial distribution pattern of dominant species in desert steppe community [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(10):4334-4341
- [11] KEMP D, HAN G, HOU F, et al. Sustainable management of Chinese grasslands—issues and knowledge [J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2018, 5(1):9-23
- [12] 王益涛,刘建康,武志嘉,等. 围封对荒漠草原典型植物群落特征及多样性的影响[J]. 水土保持研究,2025,32(1):121-130,140
WANG Y T, LIU J K, WU Z J, et al. Effects of enclosure on typical plant community characteristics and diversity in desert steppe [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(1):121-130,140
- [13] 吕世杰,刘红梅,吴艳玲,等. 放牧对荒漠草原建群种和优势种生态位的影响[J]. 生态环境学报,2014,23(10):1600-1609
LYU S J, LIU H M, WU Y L, et al. Effects of grazing on the niches of constructive species and dominant species in desert steppe [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(10):1600-1609
- [14] 李中林,秦卫华,周守标,等. 围栏封育下华北半干旱草原植物生态位研究[J]. 草地学报,2014,22(6):1186-1193
LI Z L, QIN W H, ZHOU S B, et al. Study on plant niche of semi-arid steppe in North China under enclosure [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2014, 22(6):1186-1193
- [15] 赵丽娅,钟韩珊,齐开,等. 围封和放牧对科尔沁沙地植物群落种间关联的影响[J]. 生态学报,2021,41(9):3724-3733
ZHAO L Y, ZHONG H S, QI K, et al. Effects of enclosure and grazing on interspecific associations of plant communities in Horqin Sandy Land [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(9):3724-3733
- [16] 刘嘉怡,张军,张帆,等. 围封对短花针茅荒漠草原优势种群种间联结性的影响[J]. 生态环境学报,2025,34(2):247-255
LIU J Y, ZHANG J, ZHANG F, et al. Effects of enclosure on interspecific association of dominant populations in *Stipa breviflora* desert steppe [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2025, 34(2):247-255
- [17] 石宗维,杨天友,卢志宏. 围栏封育对草地多样性的影响[J]. 草原与草业,2019,31(4):9-11
SHI Z W, YANG T Y, LU Z H. Effects of enclosure on grassland diversity [J]. *Grassland and Prataculture*, 2019, 31(4):9-11
- [18] 周天阳,高景,王金牛,等. 基于群落结构及土壤理化性质对围封7年青藏高原东南缘高山草地的综合评价[J]. 草业学报,2018,27(12):1-11
ZHOU T Y, GAO J, WANG J N, et al. Comprehensive evaluation of alpine grasslands enclosed for seven years in the south-eastern margin of the Tibetan Plateau based on community structure and soil physicochemical properties [J]. *Acta Prataculture Sinica*, 2018, 27(12):1-11
- [19] 刘欢,李兰花,任晓萌,等. 围封对西乌珠穆沁草原植物群落特征的影响[J]. 内蒙古林业科技,2022,48(1):19-23
LIU H, LI L H, REN X M, et al. Effects of enclosure on plant community characteristics in West Ujimqin grassland [J]. *Journal of Inner Mongolia Forestry Science & Technology*, 2022, 48(1):19-23
- [20] 马亚杰,贺宇杉,安光生,等. 禁牧封育对祁连山北麓温性草原群落特征的影响[J]. 草原与草坪,2025,45(4):111-118
MA Y J, HE Y S, AN G S, et al. Effects of grazing ban on the characteristics of temperate grassland community in the northern foothills of the Qilian Mountains [J]. *Grassland and Turf*, 2025, 45(4):111-118
- [21] 吴艳玲,吕世杰,刘红梅,等. 不同放牧强度对短花针茅草原植物种群种间关系的影响[J]. 生态科学,2016,35(6):34-40
WU Y L, LYU S J, LIU H M, et al. Effects of different grazing intensities on interspecific relationships of plant populations in *Stipa breviflora* desert steppe [J]. *Ecological Science*, 2016, 35(6):34-40
- [22] 李潮,谢应忠,许冬梅,等. 宁夏荒漠草原植物群落的种间关系[J]. 草业科学,2013,30(11):1801-1807
LI C, XIE Y Z, XU D M, et al. Interspecific relationships of plant communities in Ningxia desert steppe [J]. *Prataculture Science*, 2013, 30(11):1801-1807
- [23] 吕世杰,刘红梅,吴艳玲,等. 放牧对短花针茅荒漠草原建群种与优势种空间分布关系的影响[J]. 应用生态学报,2014,25(12):3469-3474
LYU S J, LIU H M, WU Y L, et al. Effects of grazing on spatial distribution relationship between constructive species and dominant species in *Stipa breviflora* desert steppe [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(12):3469-3474
- [24] 御国萍,龙金飞,卫智军,等. 放牧强度对荒漠草原不同植物功能群数量特征的影响[J]. 畜牧与饲料科学,2024,45(1):71-78
XI G P, LONG J F, WEI Z J, et al. Effects of grazing intensity on quantitative characteristics of different plant functional groups in desert steppe [J]. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2024, 45(1):71-78
- [25] 苏艳龙. 内蒙古荒漠草原不同围封年限围栏内外植被特征及土壤理化性质差异[D]. 呼和浩特:内蒙古大学,2023:1-74
SU Y L. Differences in vegetation characteristics and soil physicochemical properties inside and outside fences with different enclosure durations in Inner Mongolia desert steppe [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2023:1-74
- [26] 杨帆. 基于植物群落特征的内蒙古荒漠草原适宜围封年限对比评价[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2021:1-44
YANG F. Comparative evaluation of suitable enclosure durations based on plant community characteristics in Inner Mongolia desert steppe [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021:1-44
- [27] 方精云,沈泽昊,唐志尧,等. 中国山地植物物种多样性调查计划及若干技术规范[J]. 生物多样性,2004(1):5-9
FANG J Y, SHEN Z H, TANG Z Y, et al. The protocol for the survey plan for plant species diversity of China's mountains and some related matters [J]. *Biodiversity Science*, 2004, 12(1):5-9
- [28] LEVINS R. Evolution in changing environments: some theoretical explorations. (MPB-2) [M]. Princeton, NJ: University Press, 2020:39-65
- [29] 叶家桐,邓涛,岑华飞,等. 广西银竹老山资源冷杉群落乔木优势树种生态位与种间联结[J]. 生态学报,2025(8):1-12
YE J T, DENG T, CEN H F, et al. Niche and interspecific association of dominant tree species in *Abies ziyuanensis* community of Yinzhulaoshan Mountain, Guangxi [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025(8):1-12

- [30] 简小枚, 税伟, 陈毅萍, 等. 云南中度退化的喀斯特天坑草地植物群落优势种间关系[J]. 应用生态学报, 2018, 29(2): 492-500
JIAN X M, SHUI W, CHEN Y P, et al. Interspecific relationships of dominant species in moderately degraded karst tiankeng grassland plant community, Yunnan, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(2): 492-500
- [31] 徐满厚, 刘敏, 翟大彤, 等. 植物种间联结研究内容与方法评述[J]. 生态学报, 2016, 36(24): 8224-8233
XU M H, LIU M, ZHAI D T, et al. Review of research contents and methods of plant interspecific association[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(24): 8224-8233
- [32] 苏金娟, 刘永萍, 刘丽燕, 等. 阿勒泰荒漠区草本植物生态位与种间关联[J]. 草业科学, 2024, 41(10): 2217-2228
SU J J, LIU Y P, LIU L Y, et al. Niche and interspecific association of herbaceous plants in Altai desert area[J]. Pratacul-tural Science, 2024, 41(10): 2217-2228
- [33] 艾鑫, 薛卫星, 艾训儒, 等. 木林子矮曲林优势种生态位与种间联结性[J]. 森林与环境学报, 2024, 44(5): 501-510
AI X, XUE W X, AI X R, et al. Niche and interspecific association of dominant species in stunted forest of Mulinzi[J]. Journal of Forest and Environment, 2024, 44(5): 501-510
- [34] 辛智鸣, 邵琪雯, 王湘, 等. 乌兰布和沙漠植物多样性及绿洲-荒漠区植被地上生物量研究[J]. 生态学报, 2024, 44(18): 8234-8246
XIN Z M, SHAO Q W, WANG X, et al. Plant diversity and aboveground vegetation biomass in the oasis-desert zone of Ulan Buh Desert[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(18): 8234-8246
- [35] 吴建波, 王小丹. 围封年限对藏北退化高寒草原植物群落特征和生物量的影响[J]. 草地学报, 2017, 25(2): 261-266
WU J B, WANG X D. Effects of enclosure duration on plant community characteristics and biomass of degraded alpine steppe in Northern Tibet, China[J]. Acta Agrestia Sinica, 2017, 25(2): 261-266
- [36] GU L, GONG Z W, LI W Z. Niches and interspecific associations of dominant populations in three changed stages of natural secondary forests on Loess Plateau, P. R. China[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1-14): 6604
- [37] 郑佳华, 赵萌莉, 王琪, 等. 不同利用方式对大针茅草原生态系统多功能性的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(5): 1054-1062
ZHENG J H, ZHAO M L, WANG Q, et al. Effects of different land use patterns on ecosystem multifunctionality in Stipa grandis steppe[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(5): 1054-1062
- [38] 陈龙涛, 石晓东, 高润梅. 山西陵川南方红豆杉群落种间联结与生态位特征研究[J]. 植物科学学报, 2016, 34(4): 521-529
CHEN L T, SHI X D, GAO R M. Interspecific association and niche characteristics of Taxus chinensis var. mairei community in Lingchuan, Shanxi[J]. Plant Science Journal, 2016, 34(4): 521-529
- [39] 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. Response of plant population niche to grazing in Stipa breviflora desert steppe[J]. Chinese Journal of Grassland, 2015, 37(5): 24-32
- [40] 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 plant population niche in Stipa breviflora desert steppe[J]. Chinese Journal of Grassland, 2022, 44(10): 1-9
- [41] 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 species niche to grazing intensity in Stipa krylovii steppe[J]. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(4): 11-21
- [42] 赵婷婷, 赵念席, 高玉葆. 围封禁牧对小叶锦鸡儿灌丛化草原群落组成和结构的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(15): 4280-4287
ZHAO T T, ZHAO N X, GAO Y B. Effects of grazing exclusion on the community composition and structure of a Caragana microphylla shrubified steppe[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(15): 4280-4287
- [43] 吴婷. 荒漠草原围栏封育和围栏放牧植物多样性特征及物种共存格局[D]. 银川: 宁夏大学, 2020: 1-44
WU T. Plant diversity characteristics and species coexistence patterns of enclosed and grazing desert steppe[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2020: 1-44
- [44] 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. Response of niche characteristics and species diversity of main plant populations to enclosure duration in meadow steppe of Hulun Buir[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021, 30(10): 15-25
- [45] 李怀珠, 党哈, 许金石, 等. 不同方法研究太白山不同海拔梯度林下主要草本植物群落的种间关联[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(6): 66-73
LI H Z, DANG H, XU J S, et al. Interspecific associations of main herbaceous plant communities at different altitude gradients in Taibai Mountain by different methods[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(6): 66-73
- [46] 董乙强, 安沙舟, 孙宗玖, 等. 禁牧对中度退化伊犁绢蒿荒漠植被特征的影响[J]. 中国草地学报, 2016, 38(1): 93-99
DONG Y Q, AN S Z, SUN Z J, et al. Effects of grazing exclusion on vegetation characteristics of moderately degraded Seriphidium transilense desert[J]. Chinese Journal of Grassland, 2016, 38(1): 93-99
- [47] 杨金涛, 张晓哈, 尹正辉, 等. 禁牧对西藏贡祖山温性草原主要植物生态位及种间联结的影响[J]. 西北植物学报, 2024, 44(2): 330-337
YANG J T, ZHANG X H, YIN Z H, et al. Effects of grazing exclusion on niche and interspecific association of main plants in temperate steppe of Kuizu Mountain, Tibet[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2024, 44(2): 330-337
- [48] 刘红梅. 短花针茅草原群落特征与草地空间异质性对不同放牧制度的响应[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011: 1-153
LIU H M. Response of Stipa breviflora desert steppe community characteristics and grassland spatial heterogeneity to different grazing systems[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2011: 1-153