

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.03.021

引用格式:樊绪彬, 闫宝龙, 张书涵, 等. 氮添加对科尔沁典型草原植物种间关联及生态位的影响[J]. 草地学报, 2026, 34(3): 973–983

FAN Xu-bin, YAN Bao-long, ZHANG Shu-han, et al. Effects of Nitrogen Addition on Interspecific Association and Niche of Plants in Typical Steppe of Horqin[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(3):973–983

氮添加对科尔沁典型草原植物种间关联 及生态位的影响

樊绪彬, 闫宝龙*, 张书涵, 高明月

(内蒙古民族大学草业学院/山地草原生态系统定位研究站, 内蒙古 通辽 028000)

摘要:为探究氮沉降对草地植物种间关联及生态位的影响,本研究以科尔沁典型草原为对象,添加无机态氮(I)和有机态氮(O)各0,4,8 g·m⁻²·a⁻¹(纯氮)及其组合共9个处理,即I₀O₀, I₄O₀, I₈O₀, I₀O₄, I₀O₈, I₄O₄, I₈O₄, I₄O₈, I₈O₈。结果表明:植物群落在不添加无机态氮处理下呈随机分布,在I₄O₀处理下物种间呈正关联,在I₈O₀处理下物种间呈负关联;生态位响应具有物种特异性,木地肤(*Bassia prostrata*)生态位宽度在I₈O₄处理下较I₄O₈提升58.3%($P<0.05$),冰草(*Agropyron cristatum*)在各处理下,生态位宽度较高且稳定(0.32~0.36),并在I₈O₈处理下物种生态位高度重叠比例达87%;冰草的生态响应速率($R=2.65\sim2.97$)与生态位重叠指数($\Delta O_{ik}=0.120\sim0.138$)均较平稳,猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)在I₈O₀处理下R值激增至140.50,达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)R值持续为负(-1.62~-0.66)且 $\Delta O_{ik}<0$ 。综上,氮添加增强群落种间负关联及生态位分化,导致物种资源利用效率各异。

关键词:氮添加;种间关联;生态位;温性草原

中图分类号:S812

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)03-0973-11

Effects of Nitrogen Addition on Interspecific Association and Niche of Plants in Typical Steppe of Horqin

FAN Xu-bin, YAN Bao-long*, ZHANG Shu-han, GAO Ming-yue

(College of Prataculture/Mountain Grassland Ecosystem Positioning Research Station, Inner Mongolia Minzu University, Tongliao, Inner Mongolia 028000, China)

Abstract: To explore the effects of nitrogen (N) deposition on interspecific associations and niches of grassland plants, this study was conducted in the Horqin typical steppe. Nine treatments were set up, including the addition of inorganic N (I) and organic N (O) at three rates (0, 4, and 8 g·m⁻²·a⁻¹) and their combinations (I₀O₀, I₄O₀, I₈O₀, I₀O₄, I₀O₈, I₄O₄, I₈O₄, I₄O₈, and I₈O₈). The results showed that the plant community exhibited a random distribution under the treatments without inorganic N addition, a positive association under the I₄O₀ treatment and a negative association under the I₈O₀ treatment. Niche responses were species-specific: the niche breadth of *Bassia prostrata* in the I₈O₄ treatment was 58.3% higher than that in the I₄O₈ treatment ($P<0.05$); *Agropyron cristatum* maintained a relatively high and stable niche breadth (0.32~0.36) across all treatments, and the proportion of high niche overlap of this species reached 87% under the I₈O₈ treatment. The ecological response rate ($R=2.65\sim2.97$) and niche overlap index ($\Delta O_{ik}=0.120\sim0.138$) of *A. cristatum* were relatively stable; the R value of *Artemisia scoparia* surged to 140.50 under the I₈O₀ treatment; the R value of *Lespedeza davurica* remained negative (-1.62 to -0.66) with $\Delta O_{ik}<0$. In conclusion, N addition enhances the negative interspecific associations of the community and niche differentiation, leading to variations in resource use

收稿日期:2025-04-18;修回日期:2025-05-26

基金项目:内蒙古自治区重点研发和科技成果转化计划项目(2022YFDZ0087);高校基本科研业务费项目(GXKY25Z006);内蒙古民族大学博士科研启动基金(BS522)资助

作者简介:樊绪彬(2000-),男,汉族,甘肃张掖人,硕士生,主要从事草地生态与管理方面的研究,E-mail:1979162367@qq.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail:byan@imun.edu.cn

efficiency among species.

Key words: Nitrogen addition; Interspecific association; Niche; Temperate steppe

草地生态系统中,植物种群并非独立存在,而是多个共存物种在特定生境条件下相互依存、竞争与协同进化,从而表现出一定的关联性^[1],即种间关联。研究种间关联,有助于深入了解草地植物物种间的相互依存和制约关系及群落结构和演替动态变化^[2]。种间关联分为植物群落总体联结性和植物种对间联结性^[3]。前者常用来分析测度植物群落的稳定性^[4-5],而后者则表征两物种之间的相互作用关系,种对间正关联表示对一方或者双方是有利的,种对负关联可能表明不利于一方或对双方都不利^[6-8]。植物生态位是指植物群落中各物种所能利用的资源总和及其与各物种之间的相关关系,以及种群在群落中的地位和功能作用^[9-11]。生态位最常用的衡量指标主要有生态位宽度和生态位重叠度^[12]。种间关联及生态位对于评估物种在群落内的地位变迁、群落结构稳定性、物种共存机制以及判别演替方向等方面具有关键意义^[13-14]。

近年来,受自然条件和人类活动的共同影响,全球大气氮沉降量已增加5~20倍,预计本世纪末大气氮沉降量将继续增加2~3倍^[15]。其中氮沉降导致的生物多样性丧失以及群落结构和组成的变化可能会严重威胁草地生态系统的稳定性^[16]。氮素是草原主要限制因素之一^[17],大量研究都表明氮素对草地植物有影响。如吕超群等^[18]整合全球研究成果发现,氮的有效性会显著影响草地生态系统的物种丰富度、植物群落结构及群落动态等特征。杜忠毓等^[19]在内蒙古荒漠草原的研究表明,氮素可提高草地植物群落的地上生物量。李文娇等^[20]在贝加尔针茅草原的研究显示,当氮添加量处于较低水平(如0~50 kg·hm⁻²)时,草地物种多样性随氮添加量增加而上升;当氮添加量超过这一阈值后,随着氮添加量的继续增加,草地物种多样性则呈现下降趋势。此外,氮沉降增加会致使草地养分富集,禾本科和莎草科物种数目增加,进而提高地上生产力,但同时导致杂类草物种减少^[21-22]。然而,现有研究多聚焦于植物群落多样性,而氮沉降加剧植物种间竞争^[23],必然对生态位特征产生影响。张金屯^[6]在植物群落构建研究中指出,当物种资源供应超过一定阈值时,植物会从“资源共享型”竞争转向“资源垄断型”竞争,进而导致种间关联发生变化。付伟等^[24]研究表明,长期氮添加显著降低了温带草

原的植物多样性,其机制在于氮输入的富营养化效应改变了植物的种间竞争关系,导致一些原本具有竞争力的物种在新的环境条件下逐渐消失。另外,氮沉降不仅通过改变种间竞争关系影响植物多样性,还可能通过土壤酸化和离子毒害作用进一步削弱植物的生态位适应能力^[25]。这些为解析氮沉降背景下优势种的资源竞争策略提供了全新视角。

科尔沁草原地处我国东北西部地区,位于温带半干旱草原地带,涵盖内蒙古赤峰市和通辽市,属温带大陆性季风气候,草原植被多样性丰富^[26],对全球变化响应敏感。不同植物在氮添加影响下,种间关联和生态位的变化可能存在独特规律,但目前相关研究匮乏。基于此,本研究结合数量生态学与生态位理论,拟提出以下科学问题:(1)不同形态氮添加对植物种间关联性的影响是否具有差异性?(2)物种生态位对氮添加的响应变化是什么?(3)氮添加下植物种群生态响应速率如何变化?为解决上述问题,特此针对问题(1)设置不同形态氮的添加梯度实验,定期调查植物群落中物种组成及种间关系,运用相关性分析等数量生态学方法,探究不同形态氮添加下植物种间关联性的差异。对于问题(2),基于长期的氮添加样地监测,获取物种的生态位宽度、生态位重叠等参数,分析物种生态位对氮添加的响应变化。针对问题(3),通过连续观测植物种群的数量、生物量等指标的动态变化,结合数学模型计算生态响应速率,研究氮添加下植物种群生态响应速率的变化规律。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区位于内蒙古自治区通辽市扎鲁特旗格日朝鲁苏木芒哈图嘎查(44°62′24″N, 120°45′14″E, 482 m, 图1),该地属温带半干旱大陆性气候,春季干旱多风、夏季炎热少雨、秋季凉爽,昼夜温差大、冬季寒冷漫长,年平均气温5.5℃,年积温2400~2600℃,年平均日照时数3000 h,年无霜期115~130 d,年降水量300~400 mm,降雨集中在每年的6—8月,年均蒸发量1800 mm以上,年均湿度49%。草地类型属于温性典型草原,样地土壤类型为沙壤土,pH值为7.6。植物群落的建群种为冰草(*Agropyron cristatum*),优势种为达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、糙隐子草

(*Cleistogenes squarrosa*)、寸草苔(*Carex duriuscula*)等。

1.2 样地设置

2021年7月,在试验区选择了一块平坦、植被较均匀的代表性区域作为试验样地,采用随机区组设计,添加无机态氮[5Ca(NO₃)₂·NH₄NO₃·10H₂O,氮含量≥15%,用I表示]和有机态氮(CH₄N₂O,氮含量≥

46%,用O表示),两种形态氮素添加剂量(以纯氮计算)分别为0 g·m⁻²·a⁻¹、4 g·m⁻²·a⁻¹和8 g·m⁻²·a⁻¹,并将不同氮形态与剂量组合,共9个氮处理,分别记为I₀O₀、I₄O₀、I₈O₀、I₀O₄、I₀O₈、I₄O₄、I₈O₄、I₄O₈和I₈O₈(表1),每个处理设置4次重复,小区面积为16 m²(4 m×4 m),小区之间设置2 m的缓冲区。每年6月初,按照设定的氮素剂量,将硝酸铵钙和尿素分别均匀撒施在相应小区内,每年施肥1次。

表 1 不同形态氮素添加量

Table 1 Addition of Nitrogen in different forms

处理 Treatment	无机态氮 Inorganic nitrogen/g	有机态氮 Organic nitrogen/g	处理 Treatment	无机态氮 Inorganic nitrogen/g	有机态氮 Organic nitrogen/g
I ₀ O ₀	0	0	I ₄ O ₄	4	4
I ₄ O ₀	4	0	I ₈ O ₄	4	8
I ₈ O ₀	0	8	I ₄ O ₈	8	4
I ₀ O ₄	4	0	I ₈ O ₈	8	8
I ₀ O ₈	8	0			

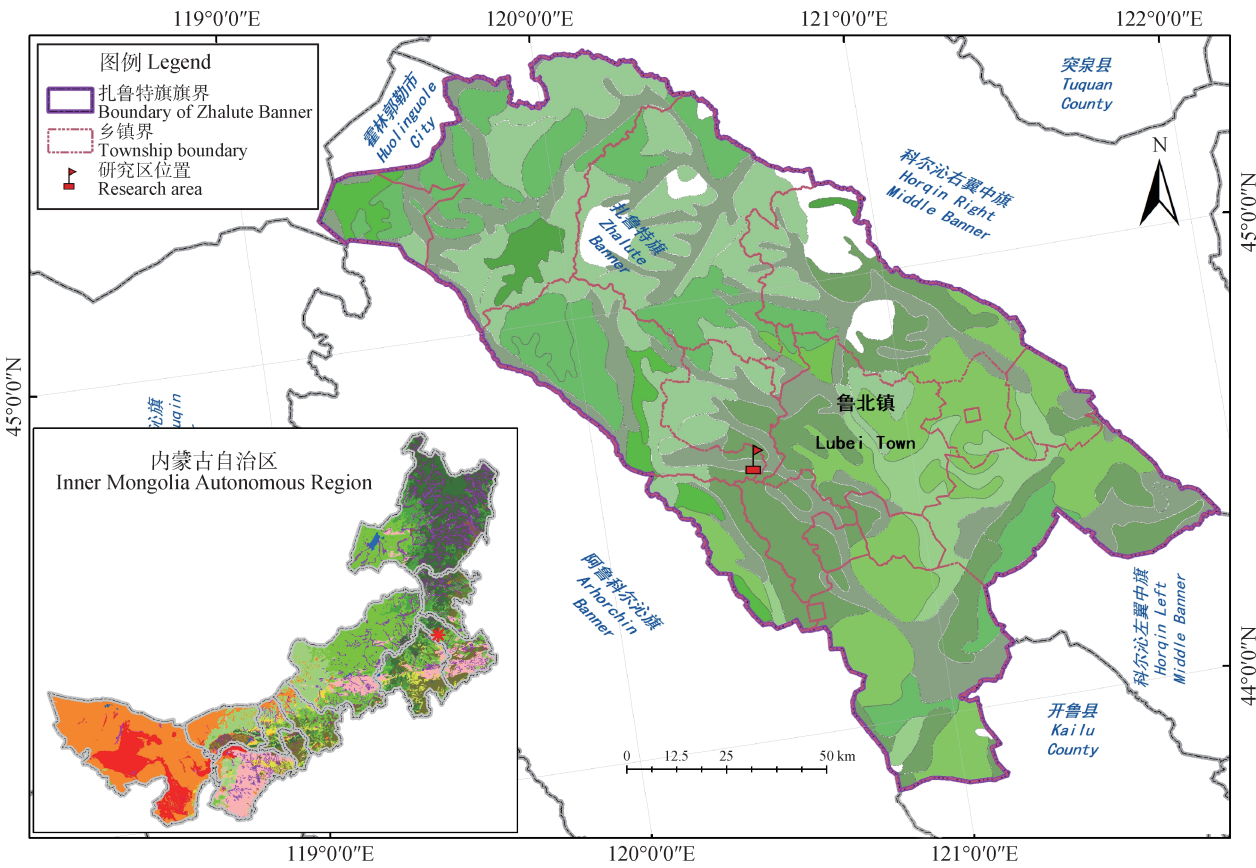


图 1 研究区域定位图

Fig. 1 Study area location map

注:该图由自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)3333号标准地图制作,底图无修改

Note: This figure/map was created based on the standard map (Approval No. GS(2019)3333) downloaded from the Standard Map Service web-site of the Ministry of Natural Resources of China. The base map has not been altered

1.3 数据采集

2024年8月下旬,在每个小区内随机选取1个1 m×1 m的样方,调查植物的种类、密度(以个体数

计)、盖度(采用针刺法测定)、频度(出现的样方数占总样方数的比例)和高度(测量每种植物的自然高度,取平均值)。

1.4 指标参数测定

植物物种的重要值(Importance value, IV)^[27]通过公式(1)计算:

$$IV = \left(\frac{h}{h_r} + \frac{C}{C_r} + \frac{D}{D_r} \right) / 3 \times 100\% \quad (1)$$

式中: h 表示某一植物的高度; h_r 表示全部植物的高度; C 表示某一植物的盖度; C_r 表示全部植物的盖度; D 表示某一植物的密度; D_r 表示全部植物的

密度。

在样地植被调查中,共记录到52种植物,为了准确分析种间关联和生态位特征,根据每个物种的重要值排名,选取了重要值>5%的物种。为此,本研究聚焦于5个关键物种:冰草(*Agropyron cristatum*)、寸草苔(*Carex duriuscula*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、木地肤(*Bassia prostrata*) (表2)。

表2 不同氮处理下植物的重要值

Table 2 Importance values of plants under different nitrogen treatments

单位: %

物种 Species	拉丁名称 Latin name	I ₀ O ₀	I ₄ O ₀	I ₈ O ₀	I ₀ O ₄	I ₀ O ₈	I ₄ O ₄	I ₈ O ₄	I ₄ O ₈	I ₈ O ₈
冰草 (Ac)	<i>Agropyron cristatum</i>	29.57	32.24	34.27	31.58	36.42	32.22	37.70	38.75	36.13
寸草苔 (Cd)	<i>Carex duriuscula</i>	23.48	18.89	19.40	21.42	17.42	18.54	15.61	18.15	19.61
猪毛蒿 (As)	<i>Artemisia scoparia</i>	12.90	19.64	16.18	19.55	12.69	14.75	15.60	12.98	13.29
达乌里胡枝子 (Ld)	<i>Lespedeza davurica</i>	8.06	5.96	5.00	4.74	5.12	5.45	5.53	7.91	5.29
木地肤 (Bp)	<i>Bassia prostrata</i>	5.44	5.35	6.28	5.79	3.18	7.94	7.55	1.39	6.56

注:不同氮添加处理下, I 表示无机态氮, O 表示有机态氮, 0, 4 和 8 分别表示氮素添加的剂量 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); 物种列表均为其拉丁名缩写: Ac 为冰草、Cd 为寸草苔、As 为猪毛蒿、Ld 为达乌里胡枝子、Bp 为木地肤。下同

Note: Under different nitrogen addition treatments, I represents inorganic nitrogen, O represents organic nitrogen, 0, 4 and 8 represent the dose of nitrogen addition ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); the species list is their Latin abbreviations: Ac is *Agropyron cristatum*, Cd is *Carex duriuscula*, As is *Artemisia scoparia*, Ld is *Lespedeza davurica*, Bp is *Bassia prostrata*. The same as below

1.4.1 种间总体关联 物种间联结指数(Variance ratio, VR)^[28]采用公式(2)(3)和(4)计算:

$$VR = S_T^2 / \sigma_T^2 \quad (2)$$

$$\sigma_T^2 = \sum_{i=1}^S P_i(1 - P_i) \quad (3)$$

$$S_T^2 = \left(\frac{1}{N} \right) \sum_{i=1}^N (T_j - t)^2, P_i = \frac{n_i}{N} \quad (4)$$

式中, S 为调查地区总的物种数; N 为总样方数; n_i 为物种 i 出现的样方数; P_i 为物种 i 出现的频度; T_j 为样方 j 内出现的物种总数; t 为全部样方中物种的平均数; S_T 为所有样方物种数的方差; σ_T 为所有物种出现的频度的方差。

1.4.2 生态位宽度及重叠 生态位宽度指数(Coefficient of niche breadth)采用 Levins (1968)^[29]指数公式(5)计算:

$$B_i = 1 / \sum_{j=1}^n (P_{ij})^2 \quad (5)$$

式中, B_i 表示物种 i 的生态位宽度; n 表示样方的数量; P_{ij} 表示物种 i 在第 j 个样方中的个体数量占该物种在所有样方中个体总数的比例。 B_i 值越大表明物种的生态位越宽, 其利用资源的总量越多, 竞争能力越强。

生态位重叠指数(Coefficient of niche overlap)采用 Pianka (1973)重叠指数^[30]公式(6)计算:

$$O_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^n p_{ij} p_{kj}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n p_{ij}^2 \sum_{j=1}^n p_{kj}^2}} \quad (6)$$

式中, O_{ik} 是物种 i 和物种 k 的生态位重叠指数, p_{ij} 和 p_{kj} 分别是物种 i 和物种 k 在资源 j 上的重要值, n

是样地数量。 O_{jk} 值越高说明物种间共同利用资源量越大, 可能存在资源利用性竞争。

生态响应速率^[31]采用公式(7)(8)计算:

$$R = \frac{B_i}{\Delta O_{ik}} (i = k) \quad (7)$$

$$\Delta O_{ik} = \left(\sum_{k=1, k \neq i}^n O_{ik} - \sum_{i=1, i \neq k}^n O_{ik} \right) \quad (8)$$

式中, R 为生态响应速率; B_i 为种 i 的生态位宽度指数。 R 值越大, 物种 i 的生态响应速率越快, 表明其在群落中的竞争优势或发展潜力越强。 $\sum_{k=1, k \neq i}^n O_{ik}$

表示 i 种群占用其他种群的资源量, $\sum_{i=1, i \neq k}^n O_{ik}$ 表示 k 种群被其他种群侵占的资源量。

1.5 统计分析

采用 Microsoft Excel 进行数据整理及重要值计算, 以重要值为输入参数通过 R 软件“spaa”包计算生态位宽度和生态位重叠, 用 SPSS 22.0 软件进行数据处理, 对不同氮处理下重要值、生态位指标等符合正态分布且方差齐的数据采用单因素方差分析(One-Way ANOVA, LSD), 结合 Duncan 氏多重比较检验法进行组间多重比较; 不符合条件的数据采用 Kruskal-Wallis 非参数检验。所有差异显著标准为 $P < 0.05$, 采用 Origin 2021 软件绘制图。

2 结果与分析

2.1 氮添加对植物群落总体关联的影响

不同氮添加量对植物群落总体关联有影响(表 3)。在 I_0O_0 , I_0O_4 , I_0O_8 处理下群落相关性呈随机分布($VR=1$),说明物种分布关系受种间相互

作用影响不明显;在 I_4O_0 , I_4O_4 , I_4O_8 处理下物种间呈正关联($VR>1$),说明物种间存在正相互作用,且环境因子促使物种共现;在 I_8O_0 , I_8O_4 , I_8O_8 处理下物种间呈负关联($VR<1$),说明因存在竞争等负相互作用,致使物种对环境条件要求差异大而较少共现。

表 3 不同氮处理对植物群落种间关联的影响

Table 3 Effects of different nitrogen treatments on interspecific associations in plant communities

处理 Treatment	N	S	变异比率 Variation ratio	统计量(W) Statistics (W)	卡方临界值 Chi-square critical value $[\chi^2_{0.95}(N-1) \leq \chi^2 \leq \chi^2_{0.05}(N-1)]$	群落相关性 Community correlation
I_0O_0	4	5	1	3	(0.35, 7.82)	随机分布 Random distribution
I_4O_0	4	5	1.2	3.6	(0.35, 7.82)	正相关 Positive association
I_8O_0	4	5	0.8	2.4	(0.35, 7.82)	负相关 Negative association
I_0O_4	5	5	1	4	(0.55, 9.49)	随机分布 Random distribution
I_0O_8	5	5	1	4	(0.55, 9.49)	随机分布 Random distribution
I_4O_4	5	5	1.1	4.4	(0.55, 9.49)	正关联 Positive association
I_8O_4	5	5	0.9	3.6	(0.55, 9.49)	负关联 Negative association
I_4O_8	5	5	1.3	5.2	(0.55, 9.49)	正关联 Positive association
I_8O_8	5	5	0.7	2.8	(0.55, 9.49)	负关联 Negative association

注: N和S分别代表同一氮添加处理下样方总数和物种总数。VR是物种间联结指数;若 $VR=1$, 种间总体无关联且随机分布; $VR>1$, 则种间总体呈正关联; $VR<1$, 种间总体呈负关联。 $W=VR \times (N-1)$ 且 W服从 χ^2 分布($df=N-1$)。若 $W<\chi^2_{0.95}(N-1)$ 或者 $W>\chi^2_{0.05}(N-1)$, 则种间总体关联显著($P<0.05$); 反之, 若 $\chi^2_{0.95}(N-1)<W<\chi^2_{0.05}(N-1)$, 则种间总体关联不显著($P>0.05$)

Note: N and S represent the total number of quadrats and species under the same nitrogen addition treatment, respectively. VR is the association index between species: if $VR=1$, there is no association and random distribution between species; $VR>1$, there was a positive correlation between species. $VR<1$, and there was a negative correlation between species. $W=VR \times (N-1)$ and W obeys χ^2 distribution ($df=N-1$). If $W<\chi^2_{0.95}(N-1)$ or $W>\chi^2_{0.05}(N-1)$, the overall correlation between species was significant ($P<0.05$). On the contrary, if $\chi^2_{0.95}(N-1)<W<\chi^2_{0.05}(N-1)$, the overall correlation between species was not significant ($P>0.05$)

2.2 氮添加对生态位宽度的影响

氮添加对冰草、寸草苔、猪毛蒿、达乌里胡枝子的生态位宽度均无显著影响(图 2A-D), 其中冰草生态位宽度相对较高且总体趋于平稳, 其余物种生态位宽度有一定波动。冰草生态位宽度在 I_0O_8 和 I_8O_8 处理下最高, 为 0.366; 寸草苔和达乌里胡枝子都在 I_0O_0 处理下生态位宽度最高, 分别为 0.337 和 0.2, 并且受氮源刺激, 生态位宽度均下降; 猪毛蒿在 I_4O_0 处理下生态位宽度最高, 为 0.316, 但随着氮剂量的增加, 生态位宽度逐渐下降。氮添加对木地肤生态位宽度有显著影响($P<0.05$, 图 2E), I_8O_4 处理下木地肤的生态位宽度显著高于 I_4O_8 处理, 其他处理间无显著差异。

2.3 氮添加对生态位重叠的影响

不同氮添加处理下 5 种主要植物的生态位重叠值表现各异(图 3)。在 I_0O_0 处理下, 冰草(Ac)与寸草苔(Cd)、猪毛蒿(As), 以及寸草苔与达乌里胡枝子(Ld)等物种间呈现高度生态位重叠($0.8 \leq O_{ik} \leq 1$), 表明其在资源利用上存在较强的竞争关系。其余物种间多为中等重叠($0.4 \leq O_{ik} < 0.8$), 反映出在部分资源利用上也存在一定的竞争关系。随着氮添加水平提升, 各物种间生态位重叠值表现出复杂的动态变化。冰草与部分物种间生态位重叠值呈先降后升趋势, 如 I_4O_0 处理下与猪毛蒿为中等重叠, I_8O_0 处理下则为高度重叠。寸草苔在无机态氮处理下, 与部分物种的生态位重叠值随氮添加量增加呈先降后升趋势; 在有机态氮和混合态氮处理下, 随

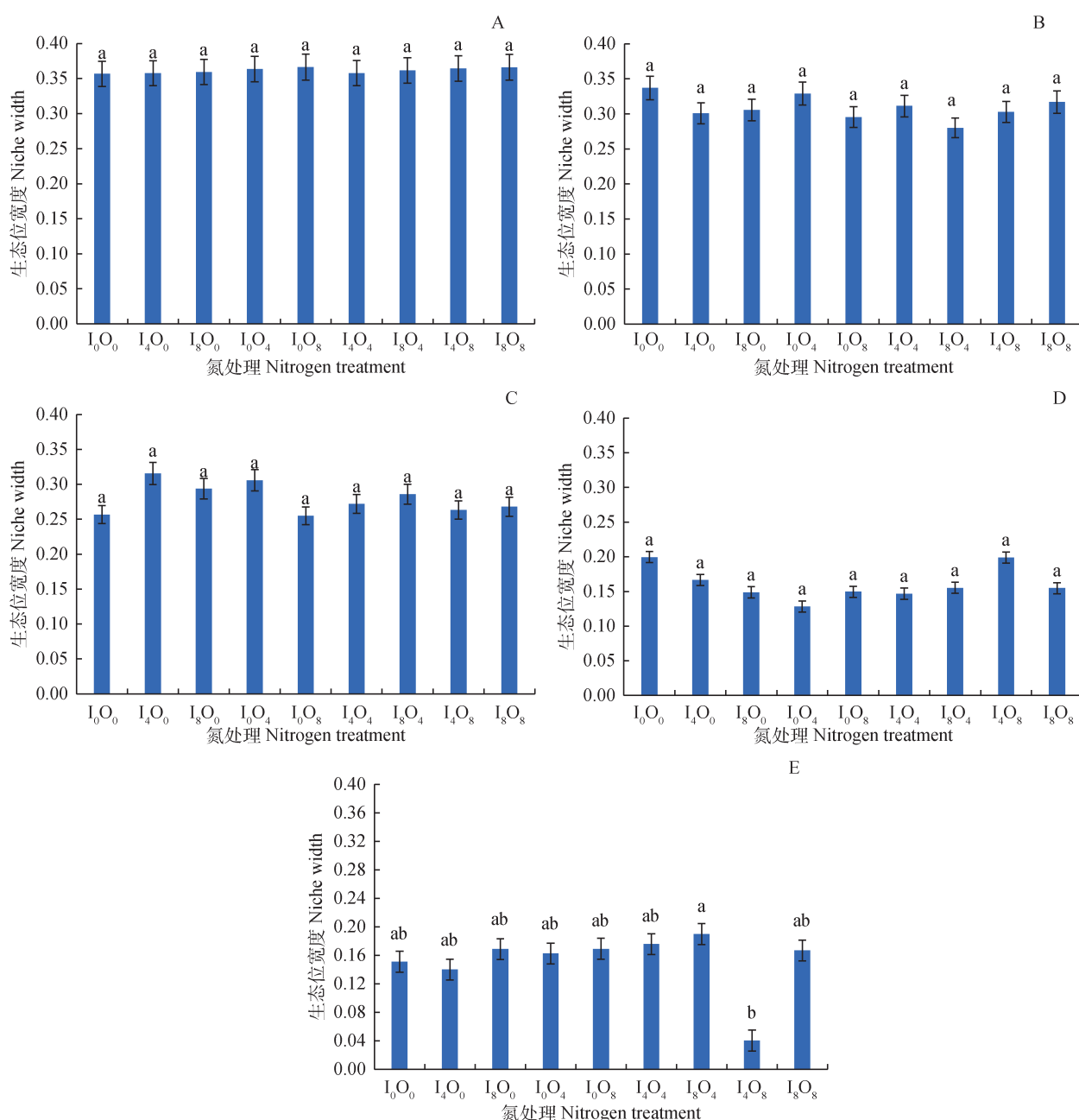


图2 不同氮处理下的植物物种的生态位宽度

Fig. 2 Niche width of plant species under different nitrogen treatments

注: A表示冰草; B表示寸草苔; C表示猪毛蒿; D表示达乌里胡枝子; E表示木地肤。数据柱形标注不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

Note: A represents *Agropyron cristatum*; B represents *Carex duriuscula*; C represents *Artemisia scoparia*; D represents *Lespedeza davurica*; E represents *Bassia prostrata*. Value columns with different lowercase letters mean significant difference ($P < 0.05$)

氮添加量的变化呈先升后降趋势。猪毛蒿在无机态氮处理下,与部分物种生态位重叠值随着氮添加量增加呈先降后升趋势;在有机态氮和混合态氮处理下,呈先升后降再升趋势。达乌里胡枝子与木地肤在高氮处理下均表现为高度重叠。

各处理组中植物生态位高度重叠 ($0.8 \leq O_{ik} \leq$

1)的对数有所差异。在 I₀O₀ 和 I₈O₄ 组分别有 9 对 (60%), I₄O₀ 和 I₀O₄ 组分别有 8 对 (53%), I₈O₀ 和 I₄O₄ 组分别有 11 对 (73%), I₀O₈ 组有 10 对 (67%), I₄O₈ 组有 7 对 (47%), I₈O₈ 组有 13 对 (87%), 其中 I₈O₈ 组生态位高度重叠对数最高为 87%, I₄O₈ 组最低为 47%。

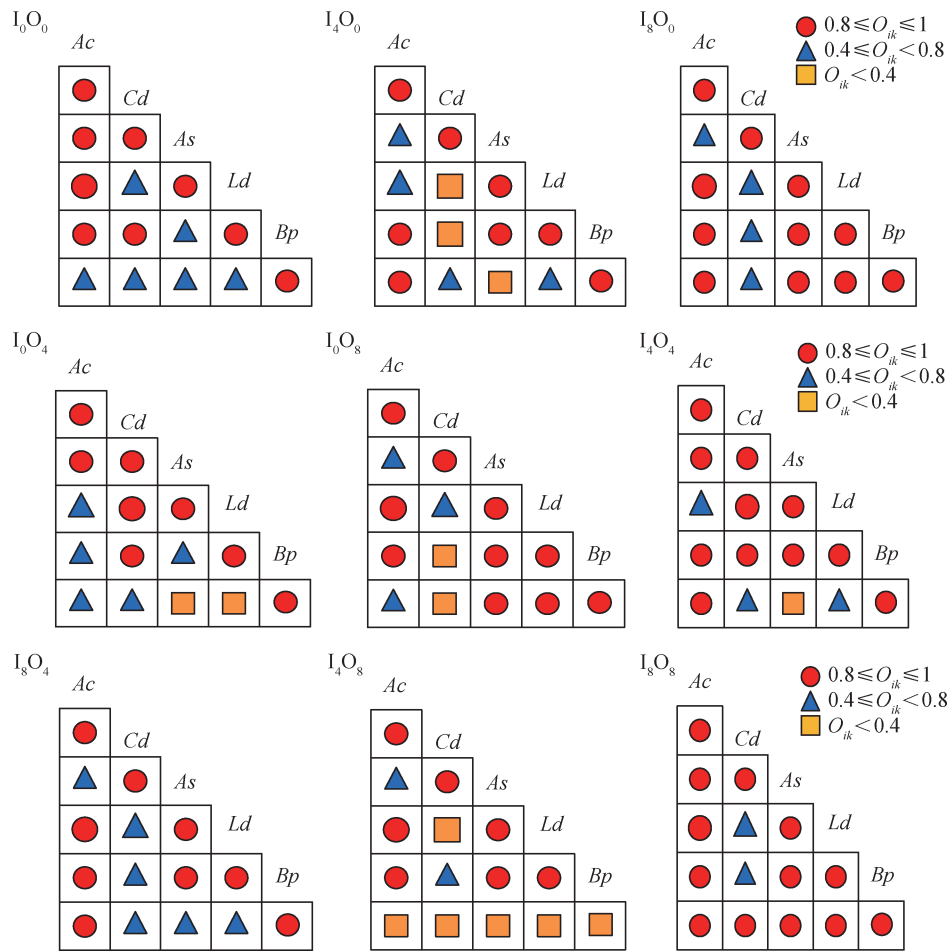


图3 不同氮处理下主要植物物种的生态位重叠值

Fig. 3 Niche overlap values of major plant species under different nitrogen treatments

注: O_{ik} 代表重叠指数; $0.8 \leq O_{ik} \leq 1$, 表示高度重叠; $0.4 \leq O_{ik} < 0.8$ 表示中等重叠; $O_{ik} < 0.4$, 表示低等重叠

Note: O_{ik} represents the overlap index; $0.8 \leq O_{ik} \leq 1$, indicating high overlap; $0.4 \leq O_{ik} < 0.8$ indicates moderate overlap; $O_{ik} < 0.4$ indicates low overlap

2.4 氮添加对种群生态响应的影响

氮添加对不同植物的资源利用效率(R 值)及竞争方向(ΔO_{ik} 值)产生了显著影响(见表4)。在资源利用效率上,冰草在各处理下 R 值(2.65~2.97)均为正值且波动范围不大,资源利用效率较稳定, ΔO_{ik} 值呈上升趋势,对资源的主动侵占能力略有增强;寸草苔在不同处理下 R 值均大于冰草,资源利用效率高, ΔO_{ik} 值整体变化幅度较小;在 I_8O_0 处理下猪毛蒿 R 值高达140.50,资源利用效率变化剧烈,在 I_4O_8 和 I_8O_8 处理下, R 值趋于 ∞ ,处于极不稳定的濒危状态,且 ΔO_{ik} 值有正有负,资源竞争方向不稳定。达乌里胡枝子、木地肤的 R 值多为负,资源利用低效, ΔO_{ik} 值均为负,处于资源被侵占的衰退状态,说明氮添加可能加剧了达乌里胡枝子的衰退。

3 讨论

3.1 氮添加对植物群落总体关联的影响

本研究发现,氮添加对植物群落种间总体关联影响各异,这与张金屯^[6]研究提出的“资源竞争极化”假说相呼应。氮形态通过改变土壤养分有效性、酸碱度等环境条件,以及植物间的化感作用、对光温水气等资源的竞争格局等物种间的相互作用来调控种间关系^[32]。这与本研究结果相符,即随着氮形态的变化,植物群落内物种间的关联关系发生分化,正负相关特征逐渐显现。 I_0O_0 (无氮添加)处理下 VR 值为1,表明群落物种间无明显相关性且随机分布。这可能是因为环境中缺乏明显的资源限制或竞争压力,种间相互作用较弱,物种在资源获取上相对独

表 4 植物物种生态响应速率 R 值及 ΔO_{ik} Table 4 R value and ΔO_{ik} of ecological response rate of plant species

生态速率参数 Ecological rate parameters	物种 Species	I_0O_0	I_4O_0	I_8O_0	I_0O_4	I_0O_8	I_4O_4	I_8O_4	I_4O_8	I_8O_8
R 值	<i>Ac</i>	2.97	2.83	2.76	2.68	2.65	2.82	2.68	2.68	2.65
	<i>Cd</i>	3.51	5.38	3.66	3.23	4.04	3.75	5.20	3.30	3.71
	<i>As</i>	-3.25	4.26	140.50	143.00	-2.42	-55.40	4.78	∞	∞
	<i>Ld</i>	-1.45	-1.04	-0.78	-0.73	-0.66	-0.79	-0.68	-1.62	-0.93
	<i>Bp</i>	-0.82	-0.75	-1.09	-0.96	-0.05	-1.41	-1.33	0	-0.76
	<i>Bp</i>	-0.82	-0.75	-1.09	-0.96	-0.05	-1.41	-1.33	0	-0.76
ΔO_{ik}	<i>Ac</i>	0.120	0.126	0.130	0.136	0.138	0.127	0.135	0.136	0.138
	<i>Cd</i>	0.096	0.056	0.086	0.102	0.075	0.084	0.054	0.099	0.084
	<i>As</i>	-0.079	0.074	0.002	0.002	-0.097	-0.005	0.060	0	0
	<i>Ld</i>	-0.137	-0.160	-0.186	-0.188	-0.200	-0.185	-0.192	-0.123	-0.167
	<i>Bp</i>	-0.185	-0.186	-0.158	-0.166	-0.316	-0.138	-0.138	-0.364	-0.183
	<i>Bp</i>	-0.185	-0.186	-0.158	-0.166	-0.316	-0.138	-0.138	-0.364	-0.183

注: R 值反映物种利用资源的效率, R 值为正值, 且值高属于高效侵占资源; R 值低属于资源利用低效。 R 值=0, 表明物种无资源竞争能力; R 值趋近于 ∞ , 资源获取几乎为 0, 属于极不稳定的濒危状态。 ΔO_{ik} 决定了物种竞争方向 (进攻/衰退)。当 $\Delta O_{ik} > 0$ 表示物种 i 主动侵占资源属于进攻性物种; $\Delta O_{ik} \approx 0$ 表示资源平衡属于中性物种; $\Delta O_{ik} < 0$ 表示物种 i 被其他物种侵占资源属于衰退性物种

Note: The R value reflects the efficiency of species using resources. The R value is positive, and the high value belongs to the efficient encroachment of resources. The low R value is an inefficient use of resources. R value=0, indicating that the species has no resource competitiveness; the R value approaches, and the resource acquisition is almost 0, which is an extremely unstable endangered state. ΔO_{ik} determines the direction of species competition (attack/decline). When $\Delta O_{ik} > 0$, it indicates that species i actively invades resources and belongs to aggressive species; $\Delta O_{ik} \approx 0$ indicates that the resource balance belongs to the neutral species; $\Delta O_{ik} < 0$ indicates that species i is encroached by other species and belongs to declining species

立, 尚未形成紧密的关联关系^[33]。在 I_4O_0 (低剂量无机态氮) 下, 物种间呈正相关关系, 可能是由于无机态氮缓解了资源限制, 促进了物种共存^[34]。在 I_8O_0 (高剂量无机态氮) 处理下, 物种间呈负相关关系, 可能是高氮加剧了资源竞争, 导致部分物种被排除或抑制^[35]。在 I_0O_4 (低剂量有机态氮) 下, VR 值为 1, 物种间分布关系受种间相互作用的影响较小, 可能是由于有机态氮需要经过土壤微生物的矿化过程才能转化为植物可直接利用的无机态氮形式, 其释放速率较慢, 在短期内无法显著改变土壤氮素供应和植物间的竞争关系^[36]。在 I_0O_8 (高剂量有机态氮) 下, VR 值仍为 1, 说明较高剂量有机态氮对种间关系的影响仍然有限。在 I_4O_4 (低剂量混合态氮) 下, VR 值为 1.1, 物种间呈正相关, 可能是无机态氮和有机态氮的协同作用, 既缓解了资源限制, 又维持了环境的稳定性^[37]。在 I_4O_8 (高剂量混合态氮) 下, VR 值为 1.3, 物种间正相关进一步增强。这可能是混合态氮在高剂量下能更全面地满足植物的营养需求, 从而促进物种共存^[38]。然而, 这种正相关可能会随着剂量的进一步增加转变为负相关。正如在 I_8O_8 处理下, VR 值为 0.7, 物种间呈负相关。

3.2 氮添加对生态位特征的影响

不同氮添加处理下, 冰草的生态位宽度稳定且

较高 (0.32~0.36), 说明冰草凭借深根系和高效氮吸收策略维持竞争优势^[39]。冰草通过优化双氮源代谢通路, 能够灵活利用无机态氮和有机态氮, 其根系构型可依据土壤氮素的分布情况动态调整 (如优化根的生长方向与分支数量), 以此增加根系在土壤中的伸展范围, 提升对氮素的吸收覆盖能力。同时, 冰草可以通过强化菌根共生网络, 提高对土壤中氮素的摄取效率, 从而在氮梯度变化中维持高于群落均值 30%~50% 的生态位宽度。此外, 猪毛蒿在 I_4O_0 处理下表现出最高的生态位宽度和资源利用效率, 说明其对中等剂量无机态氮具有较强的适应能力, 在 I_8O_0 处理下 R 值高达 140.50 (表 4), 揭示其在极端氮胁迫下采取“高周转率”生存策略, 该现象与 Agrawal^[40] 研究提出的先锋植物资源投机策略高度吻合。猪毛蒿可能通过快速吸收和利用氮素, 迅速完成生长和繁殖过程, 以应对高氮环境带来的不确定性。达乌里胡枝子和木地肤对无机态氮的适应能力较差, 在 I_8O_0 下生态位宽度和 R 值显著下降甚至为负, 可能与其对高剂量无机态氮的敏感性有关^[41-42]。此外, 混合态氮添加促进了生态位分化^[43], 这体现在本研究中 I_0O_8 处理下高度重叠种对占比达 67%, 而 I_4O_8 处理下高度重叠种对降至 47%。在 I_8O_8 组生态位高度重叠对数占比最高为 87%, 可能是由于高氮剂量打破原有资源限制, 各

物种为抢占空间资源出现快速生长策略,进而加剧生态位重叠。在混合态氮处理下,木地肤表现出较高的适应性,其生态位宽度和 R 值在 I_8O_4 处理下达到最高值,说明木地肤可能通过改变根系形态(如侧根密度增加、根毛长度延长),增加对不同形态氮素的吸收面积和效率,以便更好地适应混合态氮环境^[44]。

氮剂量的变化显著影响植物间的竞争关系和生态系统的稳定性。在低氮条件下,寸草苔和达乌里胡枝子表现出较高的生态位宽度和稳定的竞争方向,这与张伟等^[45]研究一致,其研究指出,一些喜肥物种(如阿尔泰狗娃花和达乌里胡枝子)具备更高的生长率,促进地上生物量和盖度的增加,导致生态位宽度的增加。达乌里胡枝子因具备固氮能力而生长迅速,生态位宽度随之拓宽。在中氮条件下,猪毛蒿和木地肤表现出较高的资源利用效率和生态位宽度,说明中等氮剂量可能是维持这些植物生长的最佳条件。然而,在高氮条件下,冰草和木地肤表现出更强的竞争力,其生态位宽度和 R 值显著增加,而其他植物的竞争力则受到抑制。这种现象可能导致植物间竞争加剧,进而影响生态系统的稳定性和多样性。当氮剂量超过 $8\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 时(如 I_8O_8 处理),生态位重叠值达到峰值(87%),说明可能存在剂量阈值效应。该现象与“氮饱和假说”相符^[46],即过量氮输入打破原有资源限制,导致物种通过快速生长策略抢占空间资源,反而加剧生态位重叠。达乌里胡枝子在所有处理中 R 值均为负(表4),说明其作为“保守型”物种难以适应高氮环境,可能成为氮沉降背景下的衰退物种。

4 结论

无机态氮主导群落总体关联方向,低剂量($4\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)缓解氮限制促进正关联,高剂量($8\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)加剧竞争导致负关联;豆科植物(达乌里胡枝子)与藜科(木地肤)的生态位宽度,对氮添加响应敏感;混合态氮(即无机态氮、有机态氮分别添加 $4\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)通过协同效应,维持植物种间正关联并降低生态位重叠;建群种冰草和伴生种猪毛蒿,在无机态氮低剂量下,可提高自身资源利用效率和竞争优势。综上,无机态氮通过改变资源竞争强度影响群落总体关联,不同植物对氮添加的生态位响应差异源于自身特性与适应策略,如冰草

的“氮普适型”策略、猪毛蒿的资源投机策略,混合态氮的协同效应与氮形态互补作用相关。

参考文献

- [1] 锡林塔娜. 不同载畜率下短花针茅荒漠草原群落种间关系研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2009:1
XILIN TATNA. Inter-specific Relations of *Stipa breviflora* Desert Steppe Community at Different Stocking Rates [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2009:1
- [2] 孔杨云,于应文,侯扶江. 牦牛粪沉积下高寒草甸植物群落种间关联研究[J]. 草业学报,2017,26(3):44-52
KONG Y Y, YU Y W, HOU F J. Interspecific associations in plant communities under yak dung depositions in an alpine meadow[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(3):44-52
- [3] 刘海,杜如万,王勇,等. 紫茎泽兰对四川省凉山州共生植物种间联结性及稳定性的影响[J]. 生态学报,2017,37(15):5031-5038
LIU H, DU R W, WANG Y, et al. Effects of *Eupatorium adenophorum* on interspecific association and the stability of companion species in Liangshan Prefecture of Sichuan Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(15):5031-5038
- [4] 金俊彦,覃文更,谭卫宁,等. 濒危植物单性木兰群落主要种群种间联结性研究[J]. 西部林业科学,2013,42(3):86-94
JIN J Y, QIN W G, TAN W N, et al. Interspecific association among dominant populations in endangered plant kmeria septentrionalis communities [J]. Journal of West China Forestry Science, 2013, 42(3):86-94
- [5] 刘润红,姜勇,常斌,等. 漓江河岸带枫杨群落主要木本植物种间联结与相关分析[J]. 生态学报,2018,38(19):6881-6893
LIU R H, JIANG Y, CHANG B, et al. Interspecific associations and correlations among the main woody plants in a *Pterocarya stenoptera* community in a riparian zone of Lijiang River, Guilin, Southwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(19):6881-6893
- [6] 张金屯. 数量生态学[M]. 北京:科学出版社,2004:89-95
ZHANG J T. Quantitative Ecology [M]. Beijing: Science Press, 2004:89-95
- [7] 高伟,黄雍容,林建丽,等. 濒危树种闽桦天然林优势种群种间相关性[J]. 林业科学,2021,57(10):1-14
GAO W, HUANG Y R, LIN J L, et al. Interspecific correlations among dominant populations of natural forest of endangered species *Betula fujianensis* [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2021, 57(10):1-14
- [8] 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 association of plant communities in Horqin Sandy Land, Inner Mongolia [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(9):3724-3733
- [9] GRINNELL J. The niche-relationships of the California thrasher[J]. The Auk, 1917, 34(4):427-433
- [10] 周纪纶. 植物种群生态学[M]. 北京:高等教育出版社,1992:

- 102-108
ZHOU J L. Plant Population Ecology [M]. Beijing: Higher Education Press, 1992: 102-108
- [11] 李燕芬, 铁军, 张桂萍, 等. 山西蟒河国家级自然保护区人工油松林生态位特征[J]. 生态学杂志, 2014, 33(11): 2905-2912
LI Y F, TIE J, ZHANG G P, et al. Niche characteristics of an artificial *Pinus tabulaeformis* forest in Manghe National Nature Reserve of Shanxi [J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(11): 2905-2912
- [12] 郭磊. 小秦岭与宝天曼两地区苔藓植物群落生态位特征[D]. 郑州: 河南农业大学, 2017: 10-11
GUO L. Niche characteristics of bryophyte community in Xiao-qinling and Baotianman [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2017: 10-11
- [13] 李雪梅, 程小琴. 生态位理论的发展及其在生态学各领域中的应用[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(S2): 294-298
LI X M, CHENG X Q. Development of niche theory and its application in each fields of ecology [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(S2): 294-298
- [14] 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 Prataculturae Sinica, 2020, 29(11): 11-22
- [15] SONG L, KUANG F H, SKIBA U, et al. Bulk deposition of organic and inorganic nitrogen in southwest China from 2008 to 2013 [J]. Environmental Pollution, 2017, 227: 157-166
- [16] MA F F, ZHANG F Y, QUAN Q, et al. Common species stability and species asynchrony rather than richness determine ecosystem stability under nitrogen enrichment [J]. Ecosystems, 2021, 24(3): 686-698
- [17] YUAN Z Y, LI L H, HAN X G, et al. Nitrogen resorption from senescing leaves in 28 plant species in a semi-arid region of northern China [J]. Journal of Arid Environments, 2005, 63(1): 191-202
- [18] 吕超群, 田汉勤, 黄耀. 陆地生态系统氮沉降增加的生态效应[J]. 植物生态学报, 2007, 31(2): 205-218
LÜ C Q, TIAN H Q, HUANG Y. Ecological effects of increased nitrogen deposition in terrestrial ecosystems [J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(2): 205-218
- [19] 杜忠毓, 安慧, 王波, 等. 养分添加和降水变化对荒漠草原植物群落物种多样性和生物量的影响[J]. 草地学报, 2020, 28(4): 1100-1110
DU Z Y, AN H, WANG B, et al. Effects of nutrient addition and precipitation manipulation on plant species diversity and biomass of in a desert grassland [J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(4): 1100-1110
- [20] 李文娇, 刘红梅, 赵建宁, 等. 氮素和水分添加对贝加尔针茅草原植物多样性及生物量的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(19): 6460-6469
LI W J, LIU H M, ZHAO J N, et al. Effects of nitrogen and water addition on plant species diversity and biomass of common species in the *Stipa baicalensis* Steppe, Inner Mongolia, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(19): 6460-6469
- [21] SHANG Z H, CAO J J, GUO R Y, et al. Effect of enclosure on soil carbon, nitrogen and phosphorus of alpine desert rangeland [J]. Land Degradation & Development, 2017, 28(4): 1166-1177
- [22] NIU K C, CHOLER P, DE BELLO F, et al. Fertilization decreases species diversity but increases functional diversity: a three-year experiment in a Tibetan alpine meadow [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 182: 106-112
- [23] BROOKER R W. Plant-plant interactions and environmental change [J]. New Phytologist, 2006, 171(2): 271-284
- [24] 付伟, 武慧, 赵爱花, 等. 陆地生态系统氮沉降的生态效应: 研究进展与展望[J]. 植物生态学报, 2020, 44(5): 475-493
FU W, WU H, ZHAO A H, et al. Ecological impacts of nitrogen deposition on terrestrial ecosystems: research progresses and prospects [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2020, 44(5): 475-493
- [25] NAMUHAN, WANG J, YANG G J, et al. Mechanisms of biodiversity loss under nitrogen enrichment: unveiling a shift from light competition to cation toxicity [J]. New Phytologist, 2024, 243(5): 1966-1979
- [26] 姜汇, 高凯, 周立业, 等. 科尔沁沙地植物的生态及分布区型结构分析[J]. 草业科学, 2018, 35(2): 311-322
JIANG H, GAO K, ZHOU L Y, et al. Analysis of structures of ecological and areal types of plant species in Horqin sandy land of China [J]. Pratacultural Science, 2018, 35(2): 311-322
- [27] 刘学敏, 罗久富, 陈德朝, 等. 若尔盖高原不同退化程度草地植物种群生态位特征[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(2): 289-297
LIU X M, LUO J F, CHEN D C, et al. Floristic assembly and dominant population niches in degraded grasslands on the Zoigê Plateau [J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2019, 36(2): 289-297
- [28] SCHLUTER D. A variance test for detecting species associations, with some example applications [J]. Ecology, 1984, 65(3): 998-1005
- [29] LEVINS R. Evolution in changing environments: some theoretical explorations [M]. Princeton, N. J.: Princeton University Press, 1968: 116
- [30] PIANKA E R. The structure of lizard communities [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4(1973): 53-74
- [31] 王壮壮, 朱时应, 张秋涵, 等. 亏祖山秋季不同海拔土壤纤毛虫优势种生态位及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2022, 42(9): 3494-3503
WANG Z Z, ZHU S Y, ZHANG Q H, et al. Niche of the dominant species of soil ciliates and its relationship with environmental factors at different altitudinal gradients in autumn on Kuizuo Mountain [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(9): 3494-3503
- [32] ASHTON I W, MILLER A E, BOWMAN W D, et al. Niche complementarity due to plasticity in resource use: plant parti-

- tioning of chemical N forms[J]. Ecology, 2010, 91(11):3252-3260
- [33] GROSS K. Positive interactions among competitors can produce species-rich communities[J]. Ecology Letters, 2008, 11(9):929-936
- [34] ADLER P B, SEABLOOM E W, BORER E T, et al. Productivity is a poor predictor of plant species richness[J]. Science, 2011, 333(6050):1750-1753
- [35] REICH P B, MOHANBABU N, ISBELL F, et al. High CO₂ dampens then amplifies N-induced diversity loss over 24 years[J]. Nature, 2024, 635(8038):370-375
- [36] 王常慧, 邢雪荣, 韩兴国. 草地生态系统中土壤氮素矿化影响因素的研究进展[J]. 应用生态学报, 2004, 15(11):2184-2188
- WANG C H, XING X R, HAN X G. Advances in study of factors affecting soil N mineralization in grassland ecosystems[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(11):2184-2188
- [37] 李婷玉, 姚澜, 钟于秀, 等. 绿色发展背景下的中国氮肥需求[J]. 土壤学报, 2025, 62(2):308-321
- LI T Y, YAO L, ZHONG Y X, et al. Nitrogen fertilizer demand in China in the context of green development[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(2):308-321
- [38] 邹博坤, 王欣铭, 褚章杉, 等. 氮素形态对野牛草生长及氮素吸收利用的影响[J]. 草业学报, 2022, 31(11):118-127
- ZOU B K, WANG X M, CHU Z S, et al. Effects of nitrogen forms on growth and nitrogen assimilation and utilization of *Buchloe dactyloides* [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(11):118-127
- [39] 任海燕, 田磊, 朱毅, 等. 氮水添加改变内蒙古典型草原两种优势植物的氮吸收偏好[J]. 科学通报, 2022, 67(13):1459-1468
- REN H Y, TIAN L, ZHU Y, et al. Nitrogen and water addition alter nitrogen uptake preferences of two dominant plant species in a typical Inner-Mongolian steppe[J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(13):1459-1468
- [40] AGRAWAL A A. Phenotypic plasticity in the interactions and evolution of species[J]. Science, 2001, 294(5541):321-326
- [41] 王银柳, 耿倩倩, 黄建辉, 等. 氮肥和种植密度对达乌里胡枝子的生长与生物固氮的影响[J]. 植物生态学报, 2021, 45(1):13-22
- WANG Y L, GENG Q Q, HUANG J H, et al. Effects of nitrogen addition and planting density on the growth and biological nitrogen fixation of *Lespedeza davurica* [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021, 45(1):13-22
- [42] 李德军, 莫江明, 方运霆, 等. 木本植物对高氮沉降的生理生态响应[J]. 热带亚热带植物学报, 2004, 12(5):482-488
- LI D J, MO J M, FANG Y T, et al. Ecophysiological responses of woody plants to elevated nitrogen deposition[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2004, 12(5):482-488
- [43] 贾蕴欢, 胡雯颖, 邓健, 等. 氮添加对黄土丘陵区草地土壤微生物养分限制特征的影响[J]. 草业学报, 2025, 34(2):221-232
- JIA Y H, HU W Y, DENG J, et al. Effects of nitrogen addition on soil microbial nutrient limitation characteristics in grassland in the Loess Hilly Region[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(2):221-232
- [44] 高晋丽, 宋艳宇, 宋长春, 等. 不同氮素添加量对大兴安岭冻土区泥炭地植物细根形态的影响模拟研究[J]. 生态学报, 2021, 41(20):8171-8177
- GAO J L, SONG Y Y, SONG C C, et al. Effects of different concentrations of nitrogen additions on fine root morphological characteristics in permafrost peatland in the Daxing'an Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(20):8171-8177
- [45] 张伟, 何俊皓, 郝文芳. 黄土丘陵区不同管理方式下草地优势种群的生态位[J]. 草业科学, 2016, 33(7):1391-1402
- ZHANG W, HE J H, HAO W F. Niche characteristics of dominant plant populations in grassland of Loess Hilly Region of China with different management styles[J]. Pratacultural Science, 2016, 33(7):1391-1402
- [46] ABER J D, NADELHOFFER K J, STEUDLER P, et al. Nitrogen saturation in northern forest ecosystems[J]. BioScience, 1989, 39(6):378-386

(责任编辑 闵芝智)