

doi: 10.11733/j.issn.1007-0435.2026.08.029

引用格式: 陈鹏, 余国杰, 刘蓬月, 等. 内蒙古草甸草原物种多样性和群落稳定性对刈割和施氮的季节响应[J]. 草地学报, 2026, 34(8): 3070–3080

CHEN Peng, YU Guo-jie, LIU Peng-yue, et al. Seasonal Responses of Species Diversity and Community Stability in a Meadow Steppe in Inner Mongolia to Mowing and Nitrogen Addition[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(8): 3070–3080

内蒙古草甸草原物种多样性和群落稳定性 对刈割和施氮的季节响应

陈鹏¹, 余国杰¹, 刘蓬月¹, 项梦雨¹, 张晓宇¹, 李佳桐¹, 平晓燕^{1,2,3*}

(1. 北京林业大学草业与草原学院, 北京 100083; 2. 河北省草类资源植物种质数智化重点实验室, 河北 雄安 071700;

3. 中蒙荒漠化防治合作中心, 北京 100083)

摘要: 探究物种多样性和群落稳定性对干扰的响应机制具有重要的意义。本研究以内蒙古草甸草原为研究对象, 分析物种多样性和群落稳定性对不同草原管理措施(施氮、刈割、刈割+施氮)的季节响应。研究结果表明: 施氮整体降低了物种多样性, 而刈割则维持了较高的物种多样性, 生长季内不同月份的物种多样性与群落稳定性呈非同步性变化, 但二者整体上呈正相关, Pielou均匀度指数与群落稳定性呈极显著正相关($P < 0.01$)。不同草原管理措施均提升了群落的时间稳定性, 在刈割+施氮及刈割处理下群落的时间稳定性显著提高($P < 0.05$), 施氮会降低物种异步性, 但刈割+施氮及刈割处理均提高了物种异步性, 群落时间稳定性与物种异步性呈显著正相关($P < 0.05$)。物种多样性和物种异步性共同维持了群落的稳定, 刈割通过增强物种多样性和物种异步性来促进群落稳定, 施氮会降低物种多样性, 但这种负面影响可通过刈割得到缓解, 本研究结果可为草原可持续管理提供参考依据。

关键词: 群落稳定性; 刈割; 施氮; 物种异步性; 时间稳定性

中图分类号: S812.4

文献标识码: A

文章编号: 1007-0435(2026)08-3070-11

Seasonal Responses of Species Diversity and Community Stability in a Meadow Steppe in Inner Mongolia to Mowing and Nitrogen Addition

CHEN Peng¹, YU Guo-jie¹, LIU Peng-yue¹, XIANG Meng-yu¹, ZHANG Xiao-yu¹, LI Jia-tong¹,
PING Xiao-yan^{1,2,3*}

(1. School of Grassland Science, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Hebei Key Laboratory of Herbage Germplasm Digitalization and Intelligence, Xiong'an, Hebei Province 071700, China; 3. China-Mongolia cooperation center for combating desertification, Beijing 100083, China)

Abstract: Investigating the responding mechanisms of species diversity and community stability to disturbance has significant importance. This study examined the seasonal responses of species diversity and community stability to different grassland management practices (control, nitrogen application, mowing, mowing + nitrogen application) in the meadow steppe of Inner Mongolia. Research findings showed that nitrogen addition reduced species diversity overall, whereas mowing maintained higher species diversity. Species diversity and community stability exhibited asynchronous changes across different months within the growing season, yet showing an overall positive correlation. The Pielou evenness index demonstrated a highly significant positive correlation with community stability ($P < 0.01$). All grassland management measures enhanced community temporal stability, and significant improvements observed under mowing plus nitrogen application and mowing

收稿日期: 2026-01-26; 修回日期: 2026-03-10

基金项目: 国家林业和草原局揭榜挂帅项目(202401-06); 国家林业和草原局业务委托项目(2024043003)资助

作者简介: 陈鹏(2002-), 男, 汉族, 河北唐山人, 硕士研究生, 主要从事退化草地生态恢复研究, E-mail: 13012013017@163.com; *通信作者
Author for correspondence, E-mail: pingxy@bjfu.edu.cn

treatments ($P < 0.05$). Nitrogen addition reduced species asynchrony, whereas both mowing plus nitrogen application and mowing treatments increased species asynchrony. Community temporal stability showed a significant positive correlation with species asynchrony ($P < 0.05$). Species diversity and species asynchrony jointly maintained community stability. Mowing enhanced species diversity and asynchrony, thereby promoting community stability. Nitrogen addition reduced species diversity, but this negative impact could be mitigated through mowing. The findings of this study provide a reference basis for sustainable grassland management.

Key words: Community stability; Mowing; Nitrogen addition; Species asynchrony; Temporal stability

物种多样性和群落稳定性的关系是生态学领域的重要研究内容,多样性-稳定性理论作为恢复生态学的重要理论基础,近年来得到了广泛的研究^[1-3]。自 MacArthur 和 Elton 两位学者提出多样性-稳定性理论以来^[4-5],大量研究表明物种多样性对群落稳定性具有显著的积极作用,并提出维持这种关系的多种潜在机制,如保险效应(Insurance effect)、投资组合效应(Portfolio effect)、超产效应(Overyielding effect)、选择效应(Selection effect)等^[3,6-7],但近期研究也表明二者的关系可能为正相关、负相关或不相关^[8]。因此,探究物种多样性和群落稳定性的关系对揭示群落稳定性的调控机理具有十分重要的意义。

草地面积约占全球陆地表面积的40%,作为全球陆地生态系统的重要组成部分,在维持生物多样性、促进畜牧业发展、发挥生态服务功能等方面发挥着重要作用,然而,由于气候变化和人类不合理的利用,全球约49%的草地已呈现明显退化趋势^[9-10]。草地退化会降低群落的物种多样性,导致群落结构失衡、生产力下降、土壤侵蚀加剧和群落稳定性的下降^[11]。内蒙古草甸草原具有较高的生产力和多样性,是我国重要的畜产品生产基地和天然割草地。Meta分析的结果表明,中度和重度放牧会使内蒙古草地土壤有机碳和土壤全氮含量均发生显著降低,其中草甸草原对放牧的响应相比典型草原和荒漠草原更为显著^[12-13]。如何修复退化草地和提升群落稳定性是近年来草地生态学领域的研究热点^[14-15]。

刈割是内蒙古草甸草原最具代表性的管理和利用方式,通过去除地上生物量改变群落光照与资源分配格局,适度刈割可抑制优势物种过度扩张,为其他物种提供生存空间,从而维持较高的物种多样性与群落稳定性^[16];但过度刈割会导致群落生产力下降、物种组成简化和种子繁殖率降低,进而破坏物种多样性与稳定性的平衡^[17]。合理施肥被认为是退化草地修复的有效措施,施肥通过改变土壤养分可利用性,直接调控植物生长策略与种间竞争

格局,进而重构物种多样性与群落稳定性的内在关联,适量施肥可通过缓解养分限制提升植物生产力,进而维持物种多样性^[18-19];但大量研究表明,长期过量施肥易导致土壤养分失衡,引发优势物种竞争排斥,造成稀有物种丧失,最终导致物种多样性下降^[20],而多样性-稳定性假说(Diversity-stability hypothesis)认为较高的物种多样性会通过生态位互补与物种异步性来提升群落稳定性^[21-22],因此过量施肥导致的多样性降低会削弱群落的稳定性^[20,23]。综上,探究刈割和施氮及其交互效应对草地植物群落稳定性的影响,对精准解析其生态效应和实现草地资源的可持续利用具有重要意义^[24-26]。

近年来,已有大量研究关注群落组成特征^[27]、种间相互作用^[28]、气候变化^[29-30]、地形地貌^[31]等因素对物种多样性和群落稳定性的影响,刈割、施氮等草原管理措施对二者的影响虽已有相关研究,但相对较少。此外,现有研究大都集中在高寒草原^[21,29,32]、荒漠草原^[33-35]和典型草原^[8,36],对草甸草原的研究还相对较少。目前对群落稳定性的内在调控机制尚未完全明晰,物种多样性与群落稳定性的关系是否依赖于干扰类型及群落生长季内季节变化尚不明确,这些都限制了对群落稳定性的深入理解。鉴于此,本研究提出以下核心科学问题:刈割和施氮对物种多样性和群落稳定性的影响是否存在季节差异?物种多样性和群落稳定性关系的调控机制是怎样的?综上所述,本研究以内蒙古草甸草原为研究区域,通过分析物种多样性和群落稳定性及其关系对刈割和施氮及其交互效应的季节响应,探究不同草原管理措施对群落稳定性的影响及其调控机制,研究结果将为生物多样性保护、退化草地生态修复及草原可持续管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在内蒙古兴安盟科尔沁右翼前旗的内蒙古科尔沁草原生态系统国家定位观测研究站

(46°41'N, 120°30'E, 海拔 499.7 m) 进行, 该研究站位于兴安盟中部大兴安岭森林向科尔沁草原过渡带, 属中温带半干旱大陆性季风气候, 四季分明, 冬季漫长寒冷, 春季干旱多风, 夏季温热短促, 降水集中在夏季, 雨热同季, 土壤为栗钙土, 表层 0~15 cm 土层的有机碳含量为 4.06%, 全氮含量为 0.43%, pH 值为 6.68。年均降水量和年均温分别为 449.0mm 和 2.9℃, 年均日照时数超过 2800 h。该区草地类型属温性草甸草原类, 群落优势种为羊草 (*Leymus chinensis*)、羽茅 (*Achnatherum sibiricum*), 群落常见种为草木樨状黄芪 (*Astragalus melilotoides*)、寸草苔 (*Carex duriuscula*)、叉分蓼 (*Koenigia divaricata*)、毛莲蒿 (*Artemisia vestita*)、裂叶蒿 (*Artemisia tanacetifolia*) 等。

1.2 样地设置与调查

2022 年 6 月在观测站附近放牧导致的中度退化

草地进行围封, 设置刈割和施氮 2 种处理, 采用随机区组设计, 设置对照 (CK)、施氮 (N)、刈割 + 施氮 (NC) 和刈割 (C) 四个处理。每年生长季 (6—8 月) 每月进行一次施氮, 每次施氮量是全年的 1/3, 选用的氮肥为纯度 46% 的尿素 ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$), 每次施肥选择下雨前或下雨后, 将提前称好的氮肥均匀撒施在相应的小区内, 施氮总量为 $20\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$; 为控制退化草地群落中杂类草的比例, 于每年 6 月中旬施肥前进行刈割, 留茬高度为 10 cm。每个处理设置 3 个重复, 每个试验小区面积为 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$, 相邻小区设置 1 m 的缓冲带。2025 年 6 月、7 月和 8 月下旬分别对不同处理小区开展植物群落调查, 在每个试验小区随机选取 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ 的样方, 测定样方内植物的种类、高度、盖度和密度, 并将其分为禾本科、豆科、莎草科和杂类草 4 个功能群, 然后齐地刈割, 装入自封袋, 放置于 65℃ 烘箱中烘干 48 h 后称重, 记录每个功能群的地上生物量 (表 1)。

表 1 不同草原管理措施对植物群落盖度与功能群地上生物量的影响

Table 1 Effects of different grassland management practices on community coverage and aboveground biomass of functional groups

月份 Month	处理 Treatment	群落盖度 Community coverage/%	功能群地上生物量 Aboveground biomass of functional group/g			
			禾本科 Poaceae	豆科 Fabaceae	莎草科 Cyperaceae	杂类草 Forbs
6 月 June	对照 CK	86.00±3.06 ^a	50.82±9.66 ^b	11.46±1.58 ^a	41.11±4.69 ^b	87.70±19.50 ^a
	施氮 N	94.33±1.86 ^a	110.51±14.07 ^a	3.95±1.00 ^b	79.59±14.99 ^a	96.05±11.69 ^a
	刈割+施氮 NC	93.67±1.20 ^a	81.92±15.21 ^{ab}	2.79±1.94 ^b	102.99±21.64 ^a	116.06±8.03 ^a
	刈割 C	89.00±2.08 ^a	43.64±8.96 ^b	11.39±1.46 ^a	39.37±3.56 ^b	121.00±17.28 ^a
7 月 July	对照 CK	93.33±1.66 ^a	90.26±33.92 ^{ab}	14.27±5.42 ^a	63.39±15.53 ^a	123.18±12.09 ^{ab}
	施氮 N	97.67±0.33 ^a	181.11±20.20 ^a	5.13±3.48 ^a	49.07±6.68 ^a	174.37±22.71 ^a
	刈割+施氮 NC	93.33±1.33 ^a	150.71±40.44 ^{ab}	4.84±1.55 ^a	75.08±10.49 ^a	151.02±15.54 ^{ab}
	刈割 C	86.33±0.33 ^b	54.15±7.72 ^b	9.52±4.22 ^a	60.25±6.45 ^a	103.67±7.09 ^b
8 月 August	对照 CK	95.33±0.33 ^{ab}	108.07±17.85 ^b	26.60±6.25 ^a	66.41±20.54 ^a	160.53±45.32 ^a
	施氮 N	97.00±0.58 ^a	265.48±40.57 ^a	5.02±2.41 ^b	72.71±8.73 ^a	196.24±44.06 ^a
	刈割+施氮 NC	93.67±0.88 ^b	125.89±22.48 ^b	4.18±2.97 ^b	87.13±16.37 ^a	131.22±17.89 ^a
	刈割 C	88.67±0.67 ^c	98.05±25.41 ^b	5.84±0.74 ^b	53.80±6.47 ^a	97.31±13.25 ^b

注: 同列不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)

Note: Different letters on the same column indicate significant differences ($P<0.05$)

1.3 数据处理与分析

1.3.1 物种多样性 植物群落物种多样性用 Patrick 丰富度指数 (Patrick richness index), Simpson 优势度指数 (Simpson dominance index), Shannon-Wiener 多样性指数 (Shannon-Wiener diversity index) 和 Pielou 均匀度指数 (Pielou evenness index) 描述^[21,37]。计算公式如下:

Patrick 丰富度指数 (R):

$$R = N \tag{1}$$

Simpson 优势度指数 (D):

$$D = 1 - \sum_{i=1}^N P_i^2$$

Shannon-Wiener 多样性指数 (H'):

$$H' = - \sum_{i=1}^N P_i \ln P_i \tag{3}$$

Pielou 均匀度指数 (J):

$$J = \frac{H'}{\ln(N)} \tag{4}$$

其中 N 表示每个调查样方中所有出现的物种个数; P_i 表示每个样方中 i 物种的重要值 (Important value, IV), 其计算如下:

$$P_i = \frac{R_{hi} + R_{di} + R_{ci}}{3} \tag{5}$$

其中 P_i , R_{hi} , R_{di} 和 R_{ci} 分别表示每个样方中物种 i 的重要值、相对株高、相对密度和相对盖度。

1.3.2 群落稳定性和物种异步性 群落稳定性以

群落物种密度变异系数(Coefficient of variation, CV)的倒数(Inverse coefficient of variation, I_{CV})表示^[21,33]:

$$I_{CV} = \frac{\mu}{\sigma} \quad (6)$$

式中, μ 为样方内物种的平均密度, σ 为物种密度的标准差。 I_{CV} 值越大, 表示物种密度的变异性越小, 群落稳定性越高。

时间稳定性(Temporal stability, TS)是6—8月群落地上生物量的平均值(μ)与其标准差(σ)的比值, 描述的是在不同环境条件下, 群落特征随时间变化的稳定性程度^[38], 计算公式如下:

$$I_{TS} = \frac{\mu}{\sigma} \quad (7)$$

μ 表示某一段时间植物群落地上生物量的平均值, σ 表示相应时间段内地上生物量的标准差。

物种异步性(Species asynchrony)解释了调节群落稳定性的潜在机制^[38], 计算公式如下:

$$1 - \varphi_x = 1 - \frac{\sigma^2}{\left(\sum_{i=1}^S \sigma_i\right)} \quad (8)$$

其中, φ_x 为物种同步性, $1 - \varphi_x$ 为物种异步性, σ^2 为每个调查样方中群落地上生物量在整个试验期的方差, σ_i 为每个调查样方中(有 S 个物种)物种 i 生物量在整个试验期的标准差。

1.3.3 数据分析 使用 Excel 2019 进行数据的初步整理, 运用 SPSS 25.0 进行单因素方差分析(One-way ANOVA), 分析不同处理下草地植物群落总盖度、功能群和群落地上生物量、物种多样性和群落稳定性间的差异, 并利用最小显著性差异法(LSD)进行多重比较, 所有结果使用平均值±标准误(Mean±SE)的形式呈现($P < 0.05$), 采用 Pearson 相关分析计算物种多样性和群落稳定性、物种异步性和时间稳定性间的关系, 使用 Origin 2021 (OriginLab Inc., Northampton, MA, USA) 软件完成数据可视化图表的绘制。

2 结果与分析

2.1 物种多样性和群落稳定性对不同草原管理措施的季节响应

不同草原管理措施对物种多样性和群落稳定性的影响随生长季节而有所差异。与 CK 相比, N 和 NC 处理显著降低了6月的 Patrick 丰富度指数($P < 0.05$), N 和 NC 处理下分别降低了 36.62% 和

19.72% (图 1a); N 处理显著降低了6月和7月的 Shannon-Wiener 多样性指数($P < 0.05$), 6月和7月分别降低了 15.55% 和 6.98% (图 1g-h)。与 C 处理相比, N 和 NC 处理显著降低了7月的 Patrick 丰富度指数($P < 0.05$), N 和 NC 处理下分别降低了 26.56% 和 20.31% (图 1b)。与 N 处理相比, NC 和 C 处理显著提高了7月的 Shannon-Wiener 多样性指数($P < 0.05$), NC 和 C 处理下分别提高了 8.58% 和 13.64% (图 1h)。与 CK 相比, NC 处理显著降低了8月的 Shannon-Wiener 多样性指数($P < 0.05$), NC 处理下降低了 8.80% (图 1i); N 和 NC 处理显著降低了8月的 Simpson 优势度指数($P < 0.05$), N 和 NC 处理下分别降低了 2.20% 和 2.87% (图 1l)。

群落稳定性结果显示, 6月份, C 处理相比 CK 和 NC 显著提高了6月的群落稳定性($P < 0.05$), 较 CK 和 NC 处理分别提高了 43.19% 和 52.17% (图 2a); 7月不同处理间的群落稳定性无显著差异, 但与对照相比均有所提高(图 2b); N, NC 和 C 处理相比 CK 均显著降低了8月的群落稳定性($P < 0.05$), 较 CK 分别降低了 29.54%, 26.99% 和 23.74% (图 2c)。

2.2 不同草原管理措施下物种多样性与群落稳定性间的关系

如图 3 所示, Patrick 丰富度指数、Pielou 均匀度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Simpson 优势度指数均与群落稳定性呈正相关, 其中 Pielou 均匀度指数与群落稳定性呈极显著正相关($P < 0.01$) (图 3b)。

如表 2 所示, 不同草原管理措施改变了物种多样性指数和群落稳定性间的关系, 其中 Patrick 丰富度指数与群落稳定性在 N 处理下呈显著正相关($P < 0.05$), Shannon-Wiener 多样性指数与群落稳定性在 N 处理下呈极显著正相关($P < 0.01$)。

2.3 不同草原管理措施对时间稳定性和物种异步性的影响

相比 CK, 不同处理均一定程度地提升了群落的时间稳定性, 其中 NC 和 C 处理相比对照显著提高了群落的时间稳定性($P < 0.05$), 相比 CK 分别提高了 88.32% 和 87.09% (图 4a)。物种异步性的结果表明, NC 和 C 处理相比 N 处理显著提高了物种的异步性($P < 0.05$), 相比 N 处理分别提高了 88.45% 和 107.81% (图 4b)。

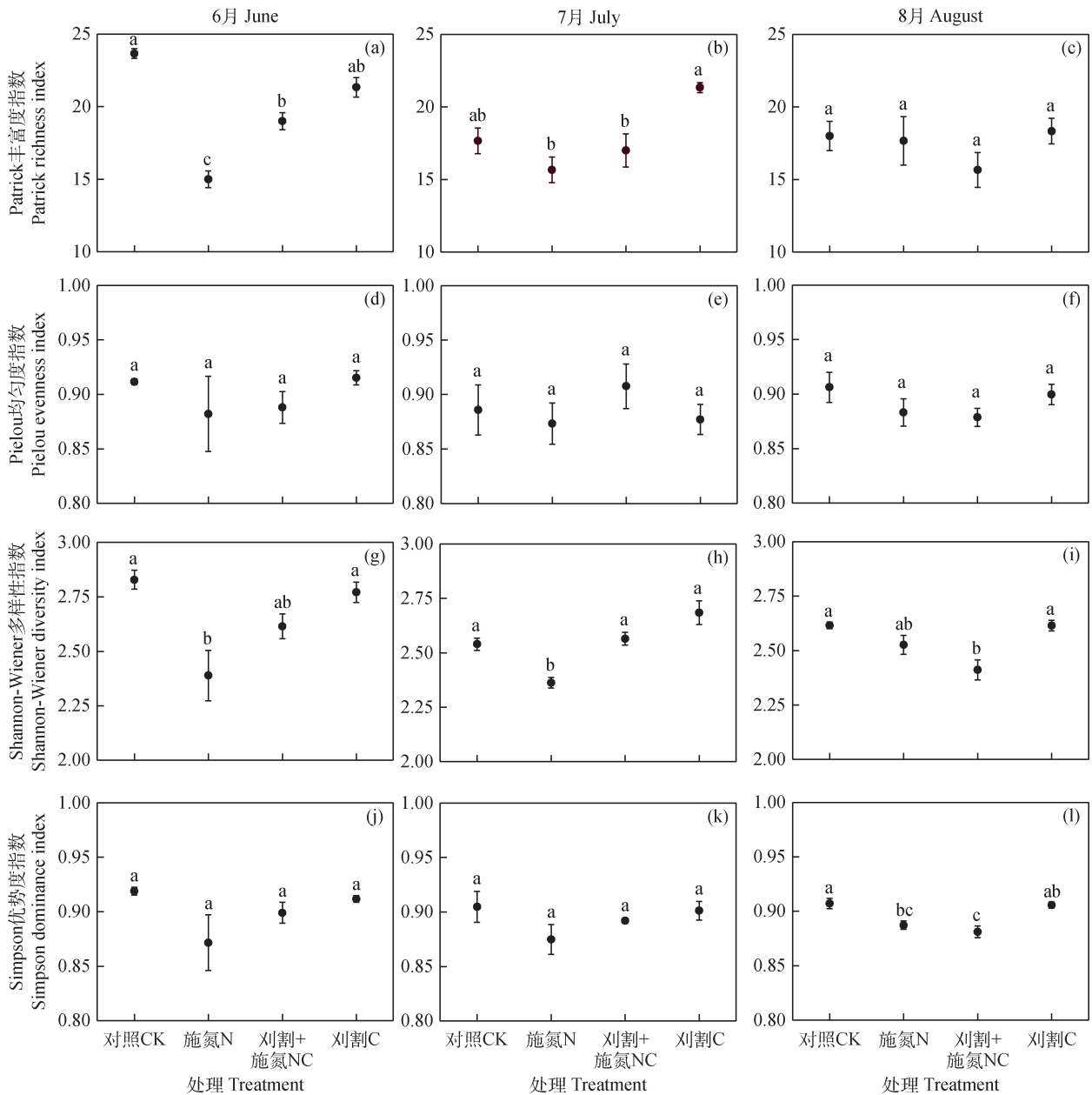


图1 物种多样性对不同草原管理措施的季节响应

Fig. 1 Seasonal responses of species diversity to different grassland management practices

注:不同字母表示同一指数在不同处理间差异显著($P < 0.05$)。下同

Note: Different letters indicate that the same indices varies significantly between different treatments ($P < 0.05$). The same as below

群落时间稳定性与物种异步性的关系结果(图5)显示,在不同处理下群落时间稳定性与物种异步性间呈现显著的正相关关系($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 不同草原管理措施对物种多样性和群落稳定性及其关系的影响

与前期研究结果一致,本研究结果表明施氮(N

和NC)对物种多样性整体上呈现抑制作用^[35,39-40],这种物种多样性变化的核心驱动机制与资源竞争格局及物种适应策略密切相关。氮素匮乏是草地植物生长受限的关键因子之一,适当施氮可缓解植物的养分限制,但养分富集也会打破物种间的平衡状态^[37]。有研究表明过量施氮会促使喜氮类优势草本(如禾草)快速生长,从而垄断光照、水分及养分资源,挤压其他物种的生存空间^[36-37,40],本研究中施氮后禾本科功能群的生物量显著上升(表1),可能

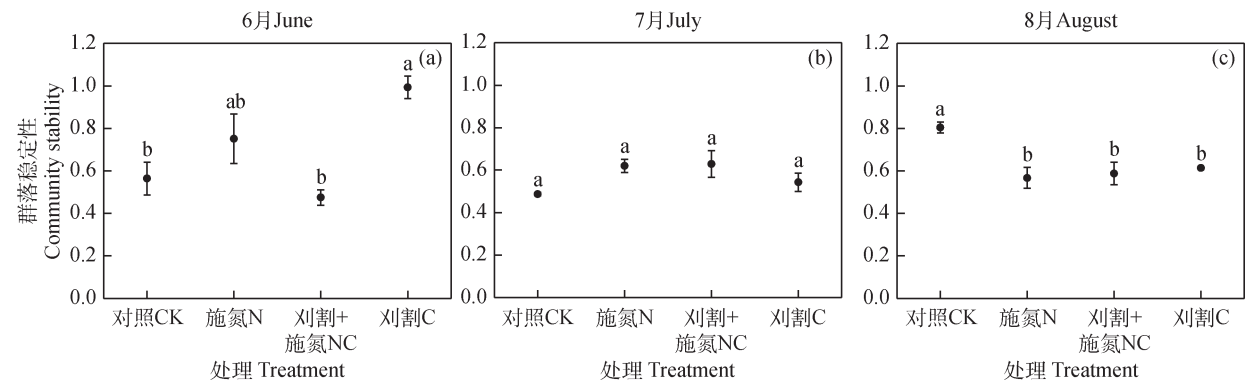


图 2 群落稳定性对不同草原管理措施的季节响应

Fig. 2 Seasonal responses of community stability to different grassland management practices

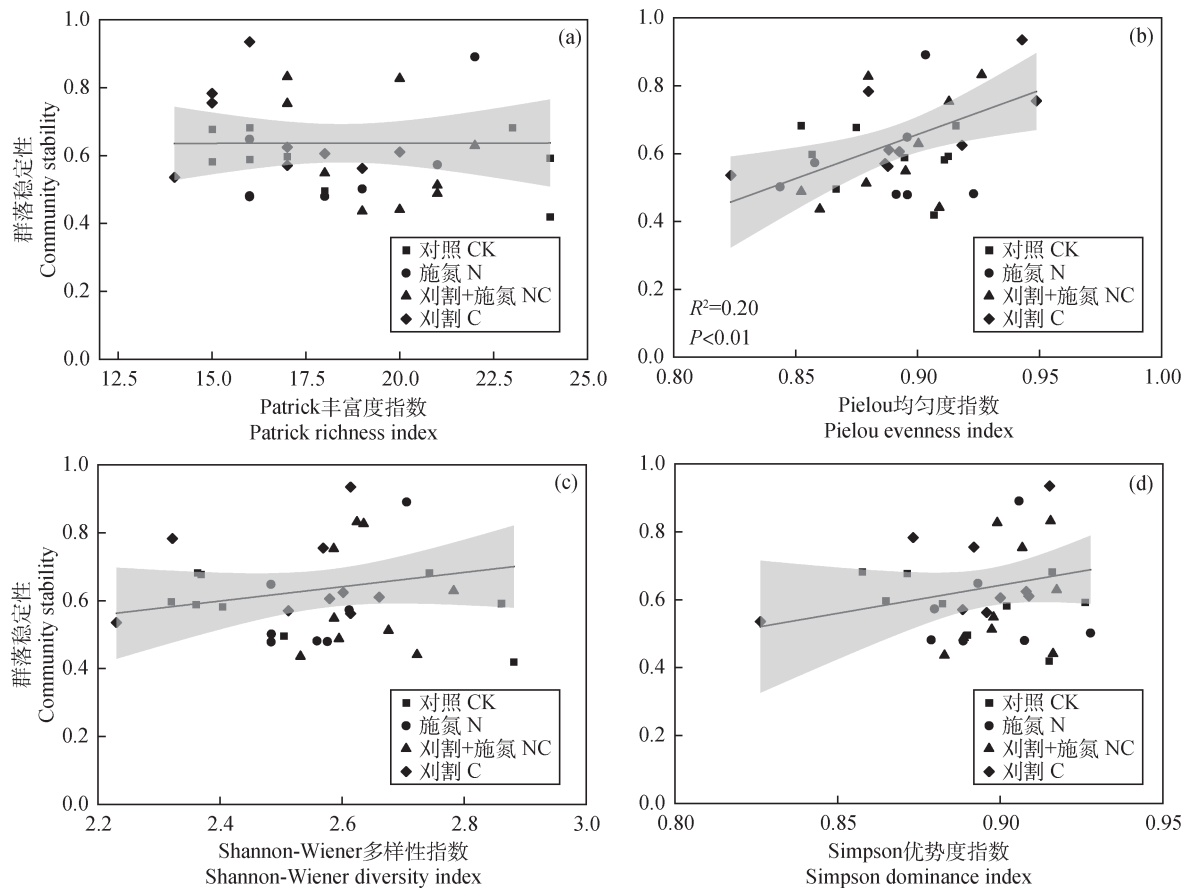


图 3 物种多样性与群落稳定性的关系

Fig. 3 Relationships between biodiversity and community stability

表 2 不同草原管理措施对物种多样性和群落稳定性关系的影响

处理 Treatment	相关性系数 Correlation coefficient			
	Patrick 丰富度指数-群 落稳定性 $R-I_{CV}$	Pielou 均匀度指数-群落 稳定性 $J-I_{CV}$	Shannon-Wiener 多样性指 数-群落稳定性 $H'-I_{CV}$	Simpson 优势度指数-群落稳 定性 $D-I_{CV}$
对照 CK	-0.32	-0.19	-0.41	-0.39
施氮 N	0.68*	0.53	0.87**	0.43
刈割+施氮 NC	-0.43	0.53	0.02	0.42
刈割 C	-0.35	0.67	0.13	0.37

注:*表示显著性相关,**表示极显著性相关

Note:* indicates a significant correlation,** indicates extremely significant correlation

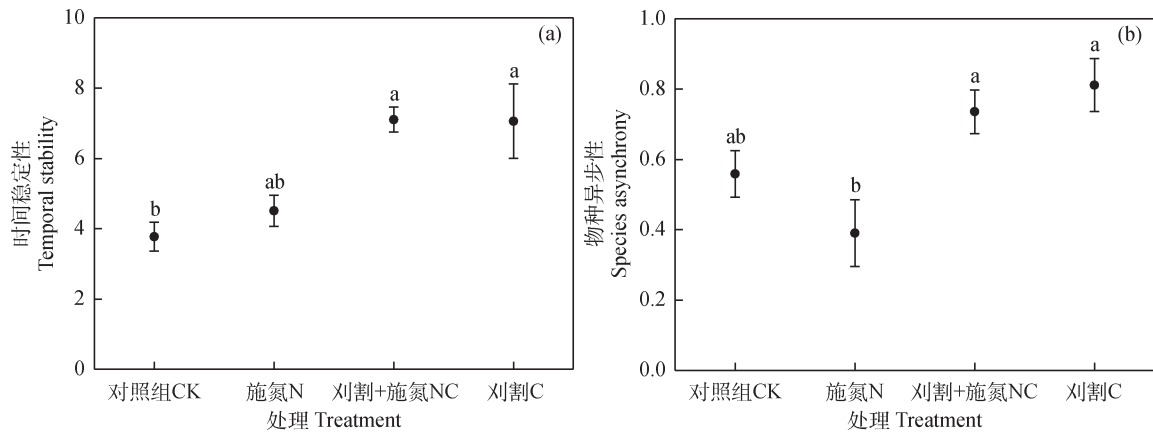


图4 不同草原管理措施对群落时间稳定性和物种异步性的影响

Fig. 4 Effects of different grassland management practices on temporal stability and species asynchrony

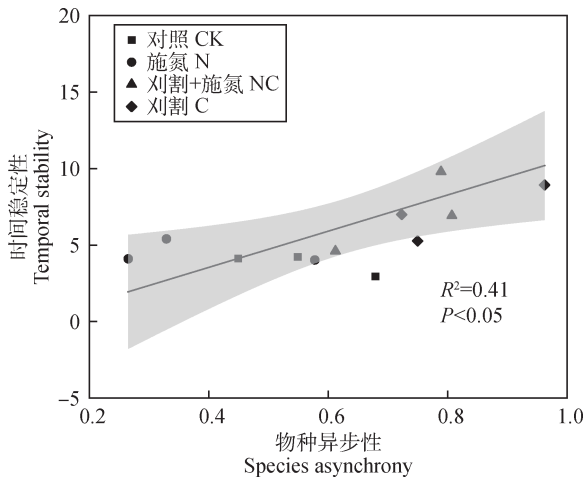


图5 时间稳定性和物种异步性的关系

Fig. 5 Relationships between temporal stability and species asynchrony

会对其他物种的生长产生抑制作用,进而降低群落的物种多样性。刈割处理在整体上维持了较高的物种多样性,可能是由于刈割通过去除部分优势物种地上生物量打破其竞争垄断,为其他物种释放生存资源,从而维持物种间资源分配均衡和减少竞争排斥效应^[41]。刈割对施氮造成的多样性损失具有一定的缓冲作用,与N处理相比,在NC处理下物种多样性有一定程度的提高(图1),但该缓冲作用无法完全抵消施氮的负面效应。有研究表明,刈割使植物群落高度均一化,在缓解光照资源竞争的同时,植物对资源的竞争转向地下,此时施氮使得部分物种有机会获得更多的生长资源^[39]。8月刈割+施氮处理下的物种多样性达到最低,可能由于刈割对生长缓慢、氮素亲和能力弱的杂类草造成胁迫,而施氮补充了一定的土壤养分,促进喜氮类禾本科植物生长的同时^[36],刈割和施氮的交互作用为较为

低矮的莎草科植物提供良好生存环境,增加了禾本科和莎草科植物的竞争能力,在一定程度上抑制了其他物种的生长。

不同处理间的群落稳定性存在一定的季节波动。生长季初期(6月和7月),水热条件逐步改善,植物处于萌发和快速生长阶段,刈割处理下较高的物种多样性增加了对环境变化的抵御能力^[32],同时刈割带来的均一化环境促进了群落内物种的生长^[39],导致较高的群落稳定性;施氮处理虽降低了物种多样性,但该时期土壤养分得到补充,可能通过富集少数耐氮优势物种,形成结构简单但抗干扰能力较强的群落^[42]。生长季后期(8月),植物生长速率降低,繁殖更新能力降低,群落更新能力减弱,施氮(N和NC)处理下,过量施氮可能导致土壤养分失衡,物种多样性的进一步降低导致了群落稳定性的下降^[35,40]。而刈割处理虽维持相对较高的多样性,但刈割会通过影响土壤微生物群落结构和破坏植物繁殖更新体系来引发群落密度的降低,进而降低群落稳定性^[25,36]。

本研究发现物种多样性和群落稳定性之间呈正相关,且均匀度与群落稳定性呈极显著正相关,这一结果充分印证了经典的物种多样性保险假说(Diversity insurance hypothesis),即物种多样性较高的生态系统,多样化的物种占据不同生态位,通过物种间的功能冗余和互补性,提高群落的稳定性^[43-44]。同时均匀度较高的群落,物种的个体数量更为均衡,每个物种的作用变大,物种通过增强互补效应和投资组合效应减小群落的波动性^[23,45]。对照组物种多样性与群落稳定性呈负相关,这可能是由于自然状态下植物的种间和种内竞争较为激烈,削弱了群落对环境波动的缓冲能力^[46];而施氮通过改

善土壤养分可利用性,缓解了资源限制,促进了物种共存与功能互补,进而强化了多样性对稳定性的促进效应^[19];在刈割+施氮和刈割处理下,Patrick丰富度指数与稳定性呈负相关,但其余三个指数转变为正相关,这可能是由于刈割通过改变群落冠层结构和资源分配,导致部分敏感物种消失,但重新平衡了存活物种的竞争关系^[47-48]。

3.2 不同草原管理措施对物种异步性和群落时间稳定性的影响

不同草原管理措施相比对照均提高了群落的时间稳定性,而时间稳定性的普遍提升,本质是不同处理通过改变物种组成、优势度格局及种间互作关系,优化了群落应对环境波动的适应策略^[3,24,31]。施氮处理下群落的时间稳定性和物种异步性均弱于刈割和施氮+刈割处理,与单一施氮处理下物种多样性的下降密切相关,反映过量施氮显著促进禾本科植物的生长(表1),进而对其他功能群的生长产生抑制作用,导致种间竞争加剧,物种响应环境变化的异步性降低,削弱了群落应对扰动的缓冲能力,导致其稳定性提升幅度有限^[37]。而刈割通过改变光照、水分等资源的利用率,影响群落中物种的结构与分布,促进了植被对于环境资源的利用,体现了刈割对稳定性的正向调控主要依赖物种异步性的提升与资源分配均衡^[49]。而刈割+施氮处理则削弱了施氮对植被群落地上特征的影响,刈割处理下群落盖度显著下降(表1),打破了单一施氮下优势物种的竞争垄断,避免物种多样性过度衰退,同时施氮为群落生物量累积提供养分,二者结合既保障了群落生产力的稳定输出,又维持了物种间的功能互补^[49]。

物种异步性与群落时间稳定性呈现显著正相关,这与大量研究结果相一致,即物种异步性是维持草地植物群落时间稳定性的核心机制。物种多样性对群落稳定性的提升很大程度上是由于物种对环境波动的异步响应^[3,50-51]。刈割和刈割+施氮处理可能通过提升物种多样性和物种异步性,强化了物种间的互补缓冲效应,成为群落稳定性提高的重要驱动因素;虽然刈割+施氮处理下8月份的物种多样性降至较低水平,但物种异步性的提升可能通过补偿效应弥补了物种多样性的下降^[52],凸显了异步性在稳定性调控中的核心作用。施氮处理下物种多样性的降低和物种异步性的下降共同导致群落稳定性的提升幅度有限,但施氮可能通过富集

优势种进而促进群落稳定,禾本科植物的生物量占比在施氮处理下显著提高,可能凭借较高的相对生长速率和竞争能力成为群落优势功能群,群落可能凭借优势种的稳定性或功能群的稳定性弥补了物种异步性降低的影响,这符合质量比假说(Mass ratio hypothesis)^[53-54]。本研究结果表明,群落时间稳定性的维持并非单一依赖物种多样性或物种异步性,而是二者协同作用的结果,而不同处理通过调控二者的平衡关系,最终影响群落的长期稳定。

4 结论

本研究以内蒙古草甸草原为研究对象,探究物种多样性和群落稳定性及其关系对不同草原管理措施的季节响应,研究结果表明不同管理措施对物种多样性与群落稳定性的调控效应存在显著的季节差异,且物种多样性与群落稳定性的关系随管理措施也呈现差异化特征。与众多研究结果一致,施氮显著降低了物种多样性,刈割在一定程度上提高了物种多样性。群落稳定性与物种多样性对不同管理措施的响应呈非同步性,但整体而言物种多样性的提高有利于维持群落的稳定,均匀度对群落稳定性的调控作用尤为显著。从整个生长季来看(6—8月),不同管理措施均提高了群落的时间稳定性,施氮降低了物种异步性,而施氮+刈割和刈割提高了物种异步性。施氮对群落时间稳定性的提升幅度有限,这与施氮导致物种多样性和物种异步性下降密切相关;刈割+施氮和刈割处理均显著提高了群落时间稳定性,刈割通过维持高多样性与高异步性,共同促进了群落的稳定,而刈割+施氮处理下,刈割可抵消施氮对于物种多样性和物种异步性的抑制作用,进而导致群落时间稳定性显著提升。本研究结果表明,群落稳定性的维持是物种多样性和物种异步性共同作用的结果,不同草原管理措施通过调整二者的关系来维持群落稳定。综上所述,刈割+施氮是兼顾草甸草原物种多样性保护、群落稳定性维持和草地生产力提升的适宜管理方式,施氮虽在一定程度上能提升群落稳定性,但存在多样性衰退的风险。

参考文献

- [1] ZHAO L, WANG S P, SHEN R H, et al. Biodiversity stabilizes plant communities through statistical-averaging effects rather than compensatory dynamics [J]. *Nature Communica-*

- tions, 2022, 13: 7804
- [2] WAGG C, ROSCHER C, WEIGELT A, et al. Biodiversity - stability relationships strengthen over time in a long-term grassland experiment[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 7752
- [3] LOREAU M, DE MAZANCOURT C. Biodiversity and ecosystem stability: a synthesis of underlying mechanisms[J]. *Ecology Letters*, 2013, 16(sup1): 106-115
- [4] MACARTHUR R. Fluctuations of animal populations and a measure of community stability[J]. *Ecology*, 1955, 36(3): 533-536
- [5] RICHARDSON D M, PYŠEK P. Elton, C. S. 1958: the ecology of invasions by animals and plants. London; Methuen[J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2007, 31(6): 659-666
- [6] EISENHAUER N, MUELLER K, EBELING A, et al. The multiple-mechanisms hypothesis of biodiversity-stability relationships[J]. *Basic and Applied Ecology*, 2024, 79: 153-166
- [7] ZHANG Y H, LOREAU M, LÜ X T, et al. Nitrogen enrichment weakens ecosystem stability through decreased species asynchrony and population stability in a temperate grassland[J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(4): 1445-1455
- [8] KANG S, MA W J, LI F Y, et al. Functional redundancy instead of species redundancy determines community stability in a typical steppe of Inner Mongolia[J]. *PLoS One*, 2015, 10(12): e0145605
- [9] BARDGETT R D, BULLOCK J M, LAVOREL S, et al. Combatting global grassland degradation[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(10): 720-735
- [10] 李周园, 叶小洲, 王少鹏. 生态系统稳定性及其与生物多样性的关系[J]. *植物生态学报*, 2021, 45(10): 1127-1139
- LI Z Y, YE X Z, WANG S P. Ecosystem stability and its relationship with biodiversity[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, 45(10): 1127-1139
- [11] 王宗松, 姜丽丽, 汪诗平, 等. 草地退化恢复评估方法述评[J]. *生态学报*, 2022, 42(16): 6464-6473
- WANG Z S, JIANG L L, WANG S P, et al. Assessment methods for grassland restoration[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(16): 6464-6473
- [12] 张雨欣, 杜宜霖, 刘小茜, 等. 放牧活动对内蒙古草地生态系统的影响[J]. *生态学报*, 2025, 45(10): 4963-4974
- ZHANG Y X, DU Y L, LIU X Q, et al. Impact of grazing activities on grassland ecosystems in Inner Mongolia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(10): 4963-4974
- [13] 郝东恺, 金东艳, 那亚, 等. 基于 meta 分析的放牧强度对中国温性草甸草原生态系统的影响[J]. *畜牧与饲料科学*, 2025, 46(6): 37-44
- HAO D K, JIN D Y, NA Y, et al. Effects of grazing intensity on temperate meadow grassland ecosystems in China based on a meta-analysis[J]. *Animal Husbandry and Feed Science*, 2025, 46(6): 37-44
- [14] 张海燕, 樊江文, 黄麟, 等. 近 20 年北方草原生态价值核算及其时空差异特征[J]. *生态学报*, 2024, 44(6): 2337-2350
- ZHANG H Y, FAN J W, HUANG L, et al. Spatiotemporal variation characteristics of grassland ecosystem values and their differences in northern China from 2000 to 2020[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(6): 2337-2350
- [15] 唐华俊, 辛晓平, 李向林, 等. 北方草甸和草甸草原生态恢复的理论、技术与实践[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(13): 2527-2531
- TANG H J, XIN X P, LI X L, et al. Theory, technology and practice of ecological restoration of meadow and meadow steppe in northern China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(13): 2527-2531
- [16] YANG H J, JIANG L, LI L H, et al. Diversity-dependent stability under mowing and nutrient addition: evidence from a 7-year grassland experiment[J]. *Ecology Letters*, 2012, 15(6): 619-626
- [17] 刘美丽, 梁秀梅, 乌仁其其格. 刈割制度对围封羊草草地群落特征及生物量的影响[J]. *草业科学*, 2016, 33(11): 2319-2325
- LIU M L, LIANG X M, WU R Q Q G. The effects of different mowing system on plant community characteristics and biomass in fenced *Leymus chinensis* grassland[J]. *Pratacultural Science*, 2016, 33(11): 2319-2325
- [18] 宣瑞智, 余维维, 郭焱培, 等. 水氮添加对毛乌素沙地黑沙蒿群落功能多样性和生态系统多功能性的影响[J]. *生态学报*, 2025, 45(23): 11831-11844
- XUAN R Z, SHE W W, GUO Y P, et al. Effects of water and nitrogen addition on the functional diversity and ecosystem multifunctionality of *Artemisia ordosica* community in the Mu Us Desert[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(23): 11831-11844
- [19] 李文, 曹文侠, 魏巍, 等. 培育措施对高寒草甸草原植物多样性和生产力的影响[J]. *草地学报*, 2015, 23(3): 457-462
- LI W, CAO W X, WEI W, et al. Effects of grassland cultivation measures on plant diversity and productivity in the Alpine meadow-steppe[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2015, 23(3): 457-462
- [20] ZHOU M, YANG Q, ZHANG H J, et al. Plant community temporal stability in response to nitrogen addition among different degraded grasslands[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 729: 138886
- [21] WANG C Y, WEI M, WU B D, et al. Alpine grassland degradation reduced plant species diversity and stability of plant communities in the Northern Tibet Plateau[J]. *Acta Oecologica*, 2019, 98: 25-29
- [22] 龙诗怡, 张博博, 夏宇辰, 等. 本地群落多样性和时间稳定性对加拿大一枝黄花生物量的影响[J]. *生物多样性*, 2024, 32(11): 21-34
- LONG S Y, ZHANG B B, XIA Y C, et al. Effects of diversity and temporal stability of native communities on the biomass of invasive species *Solidago canadensis*[J]. *Biodiversity Science*, 2024, 32(11): 21-34
- [23] LIU J S, LI X F, MA Q H, et al. Nitrogen addition reduced ecosystem stability regardless of its impacts on plant diversity[J]. *Journal of Ecology*, 2019, 107(5): 2427-2435

- [24] ZHANG H Y, LIU C X, TAN J L, et al. Effect of nutrient addition and mowing on plant diversity and soil carbon content of meadow steppe in Inner Mongolia[J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 393: 127101
- [25] 武帅楷, 林茂, 郝杰, 等. 短期刈割对晋北农牧交错带草地生物量的影响[J]. *生态学报*, 2024, 44(19): 8532-8541
WU S K, LIN M, HAO J, et al. The effect of short-term mowing on grassland biomass in agro-pastoral ecotone of northern Shanxi Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(19): 8532-8541
- [26] 申亚慧, 赵祥, 许庆方, 等. 增水增氮对盐渍化草地植物功能多样性的影响[J]. *生态学报*, 2026, 46(5): 2598-2610
SHEN Y H, ZHAO X, XU Q F, et al. Interactive effects of increased precipitation and nitrogen addition on plant functional diversity in a saline grassland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2026, 46(5): 2598-2610
- [27] CROTTY S M, SHARP S J, BERSOZA A C, et al. Foundation species patch configuration mediates salt marsh biodiversity, stability and multifunctionality[J]. *Ecology Letters*, 2018, 21(11): 1681-1692
- [28] MENG B, LUO M Y, LOREAU M, et al. Stabilizing effects of biodiversity arise from species-specific dynamics rather than interspecific interactions in grasslands[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2025, 9(10): 1837-1847
- [29] MA Z Y, LIU H Y, MI Z R, et al. Climate warming reduces the temporal stability of plant community biomass production[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 15378
- [30] MOHANBABU N, ISBELL F, HOBBIE S E, et al. Elevated CO₂ and N gradually weaken the influence of diversity on ecosystem stability[J]. *Ecology Letters*, 2025, 28(8): e70170
- [31] 乔欢欢, 李强, 何国兴, 等. 山地草甸植被生物多样性及群落稳定性对坡向的响应[J]. *草地学报*, 2022, 30(8): 2173-2181
QIAO H H, LI Q, HE G X, et al. Response of vegetation biodiversity and community stability of mountain meadow to slope aspect[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(8): 2173-2181
- [32] 雷石龙, 廖李容, 王杰, 等. 高寒草地植物多样性与Godron群落稳定性关系及其环境驱动因素[J]. *草业学报*, 2023, 32(3): 1-12
LEI S L, LIAO L R, WANG J, et al. The diversity-Godron stability relationship of Alpine grassland and its environmental drivers[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(3): 1-12
- [33] 何文强, 王瑞霞, 田英, 等. 毛乌素沙地南缘柠条固沙林演替过程中草本植物多样性与群落稳定性动态变化及其驱动因素[J]. *生态学报*, 2025, 45(22): 11171-11183
HE W Q, WANG R X, TIAN Y, et al. Dynamics of understorey herbaceous plant diversity and community stability and its driving factors during succession of lemon strip sand fixation forests at the southern edge of the Mu Us Desert[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(22): 11171-11183
- [34] 杨云涛, 邱开阳, 王玉娟, 等. 氮磷添加对宁夏荒漠草原植物物种多样性和群落稳定性的影响[J]. *草地学报*, 2025, 33(1): 222-230
YANG Y T, QIU K Y, WANG Y J, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on plant species diversity and community stability in the desert steppe of Ningxia[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(1): 222-230
- [35] 张馨文, 安慧, 杜忠毓, 等. 氮添加对宁夏荒漠草原植物初级生产力的影响机制[J]. *生态学报*, 2023, 43(6): 2476-2487
ZHANG X W, AN H, DU Z Y, et al. Effects and mechanism of nitrogen addition on primary productivity in a desert grassland of Ningxia, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(6): 2476-2487
- [36] 倪清睿, 杨兆平, 呼格吉勒图, 等. 施肥和刈割对内蒙古典型草原群落特征的影响[J]. *中国草地学报*, 2024, 46(7): 81-89
NI Q R, YANG Z P, HU G J L T, et al. Effects of fertilization and mowing on plant community characteristics in typical steppe of Inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(7): 81-89
- [37] 陈丽, 田新民, 任正炜, 等. 养分添加对天山高寒草地植物多样性和地上生物量的影响[J]. *植物生态学报*, 2022, 46(3): 280-289
CHEN L, TIAN X M, REN Z W, et al. Effects of nutrient addition on plant diversity and above-ground biomass in Alpine grasslands of Tianshan Mountains, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2022, 46(3): 280-289
- [38] LAI S B, WU Z, LIU Y, et al. Grazing and selenium influence community stability by increasing asynchrony and sedge, forbs stability in Alpine meadow of Qinghai-Tibet Plateau[J]. *European Journal of Agronomy*, 2024, 160: 127292
- [39] DU M G, FAN J, LIU M, et al. Mowing and phosphorus affect plant diversity and soil carbon and nitrogen storage under nitrogen enrichment in the semi-arid Alpine steppe[J]. *Catena*, 2022, 217: 106458
- [40] 邓彤彤, 周国英, 肖元明, 等. 长期降水变化和氮添加对青藏高原高寒草原物种多样性和生产力的影响[J]. *草地学报*, 2024, 32(5): 1448-1458
DENG T T, ZHOU G Y, XIAO Y M, et al. Effects of long-term precipitation changes and nitrogen addition on species diversity and productivity of Alpine grasslands in the Qinghai Tibet Plateau[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(5): 1448-1458
- [41] 徐亚飞, 呼格吉勒图, 宝音陶格涛. 长期刈割对羽茅密度和生物量的影响[J]. *中国草地学报*, 2024, 46(10): 68-74
XU Y F, HU G J L T, BAO Y T G T. Effects of long-term mowing on the density and biomass of *Achnatherum sibiricum*[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(10): 68-74
- [42] 王李娟, 马长乐, 杨建欣, 等. 苍山西坡常绿阔叶林乔木层优势种生态位特征及种间联结[J]. *中南林业科技大学学报*, 2025, 45(5): 77-88, 102
WANG L J, MA C L, YANG J X, et al. Niche and interspecific association of dominant species in tree layer of broad-leaved evergreen forests on the western slope of the Cangshan mountain[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2025, 45(5): 77-88, 102
- [43] 杨英, 王红, 候文慧, 等. 草原植物群落时间稳定性研究进展[J].

- 生态科学, 2024, 43(6): 232-239
YANG Y, WANG H, HOU W H, et al. Research progress of temporal stability of plant community in grassland[J]. Ecological Science, 2024, 43(6): 232-239
- [44] 项清, 于欢. 祁连山南麓植被多样性对生态系统稳定性的影响: 景观尺度验证“保险假说”[J]. 生态学报, 2025, 45(23): 11693-11704
XIANG Q, YU H. Impact of vegetation diversity on ecosystem stability in the southern foot of the Qilian Mountains: verifying the “Insurance Hypothesis” at the landscape scale [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(23): 11693-11704
- [45] WANG X Y, GE Y, GAO S, et al. Evenness alters the positive effect of species richness on community drought resistance *via* changing complementarity [J]. Ecological Indicators, 2021, 133: 108464
- [46] 汤永康, 武艳涛, 武魁, 等. 放牧对草地生态系统服务和功能权衡关系的影响[J]. 植物生态学报, 2019, 43(5): 408-417
TANG Y K, WU Y T, WU K, et al. Changes in the trade-offs of grassland ecosystem services and functions under different grazing intensities[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2019, 43(5): 408-417
- [47] 马燕丹, 郑秋竹, 张勇, 等. 滇西北退化高寒草甸植物群落结构对刈割的响应[J]. 生态学报, 2022, 42(19): 8073-8081
MA Y D, ZHENG Q Z, ZHANG Y, et al. Responses of plant community structure to mowing in the degraded Alpine meadows, Northwestern Yunnan Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(19): 8073-8081
- [48] ZHAO T Q, SUO R Z, ALEMU A W, et al. Mowing increased community stability in semiarid grasslands more than either fencing or grazing[J]. Ecological Applications, 2024, 34(5): e2985
- [49] 周娟娟, 魏巍. 施肥和刈割协同对藏北高原禾草混播群落动态和超产的影响[J]. 草业学报, 2023, 32(10): 28-39
ZHOU J J, WEI W. Interactive effect of fertilization and cutting on community dynamics and transgressive overyielding effect of grass pasture in the northern Tibetan Plateau[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(10): 28-39
- [50] LIANG M W, LIANG C Z, HAUTIER Y, et al. Grazing-induced biodiversity loss impairs grassland ecosystem stability at multiple scales [J]. Ecology Letters, 2021, 24(10): 2054-2064
- [51] JIANG Q X, ZHU J T, SHI P L, et al. Species asynchrony maintains community stability under different warming conditions[J]. Journal of Plant Ecology, 2024, 17(3): rtac037
- [52] 严雅婷, 王淳忆, 郭富康, 等. 高寒草地不同功能群物种共存及其对群落生产力和稳定性的影响[J]. 生态学报, 2025, 45(22): 11193-11204
YAN Y T, WANG C Y, GUO F K, et al. Coexistence of species from different functional groups in an Alpine grassland and its effects on community productivity and stability [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(22): 11193-11204
- [53] 贺聪, 马永才, 字洪标. 不同围封年限对高寒草地植物群落的影响[J]. 草业学报, 2025, 34(11): 17-30
HE C, MA Y C, ZI H B. Effects of the duration of grazing exclusion on plant communities in Alpine grassland [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(11): 17-30
- [54] HILLEBRAND H, BENNETT D M, CADOTTE M W. Consequences of dominance: a review of evenness effects on local and regional ecosystem processes [J]. Ecology, 2008, 89(6): 1510-1520

(责任编辑 付 宸)