

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.06.023

引用格式:冯探,蒲鑫,吕春磊,等.氮磷添加对退化高寒草原生产力与生物多样性的影响[J].草地学报,2026,34(6):2207—2216

FENG Tan, PU Xing, LÜ Chun-lei, et al. Effects of Nitrogen and Phosphorus Addition on the Productivity and Biodiversity in Degraded Alpine Steppe[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(6):2207—2216

氮磷添加对退化高寒草原生产力与生物多样性的影响

冯探¹, 蒲鑫¹, 吕春磊¹, 孙磊^{1,2*}

(1. 西藏农牧大学林草学院, 西藏 林芝 860000; 2. 羌塘高寒草地生态系统定位研究站, 西藏 那曲 852000)

摘要:为探究协同恢复退化高寒草原生产力与维持生物多样性的适宜氮添加浓度,本研究在藏北高寒草原(海拔4634 m)开展随机区组试验,设置自然条件及施磷条件下的6个氮添加梯度(0, 5, 10, 15, 20和25 g·m⁻²·a⁻¹ N),利用混合效应模型分析氮添加对植物地上生物量、群落结构及多样性的影响。结果表明,短期氮添加显著提高植物地上生物量,且促进效应随氮浓度升高而增强;同时显著降低植物多样性,抑制效应随氮浓度增加而加剧,禾本科植物重要值的提高,以及莎草科和杂类草植物重要值的降低。施磷增强了氮添加对植物地上生物量的正向效应,但未显著加剧对植物多样性的抑制。本研究揭示,施磷条件下适度氮添加(10~15 g·m⁻²·a⁻¹ N)可能是恢复退化高寒草原的有效恢复措施,为高寒草原生态系统的可持续管理提供了科学依据。

关键词:氮添加;磷限制;高寒草原;植物地上生物量;植物多样性;群落结构

中图分类号:Q489.15;S812.8

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)06-2207-10

Effects of Nitrogen and Phosphorus Addition on the Productivity and Biodiversity in Degraded Alpine Steppe

FENG Tan¹, PU Xing¹, LÜ Chun-lei¹, SUN Lei^{1,2*}

(1. The Forestry and Grassland College of Xizang Agricultural and Animal Husbandry University, Linzhi, Xizang 860000;

2. Qiangtang Alpine Grassland Ecosystem Research Station, Naqu, Xizang 852000)

Abstract: To investigate the appropriate nitrogen addition concentration for synergistically restoring productivity and maintaining biodiversity in degraded alpine steppe, this study conducted a randomized block experiment in the northern Xizang alpine steppe (elevation 4634 m). Six nitrogen addition gradients (0, 5, 10, 15, 20, and 25 g·m⁻²·a⁻¹ N) were set under natural conditions and with phosphorus application. Mixed-effect models were used to analyze the effects of nitrogen addition on plant aboveground biomass, community structure, and diversity. The results showed that short-term nitrogen addition significantly increased plant aboveground biomass, with the promoting effect strengthening as nitrogen concentration increased. Simultaneously, nitrogen addition significantly reduced plant diversity, with the inhibitory effect intensifying with higher nitrogen concentrations, accompanied by an increase in the importance value of grasses and a decrease in the importance values of sedges and forbs. Phosphorus application enhanced the positive effect of nitrogen addition on aboveground biomass but did not significantly exacerbate the inhibition of plant diversity. This study reveals that moderate nitrogen addition (10~15 g·m⁻²·yr⁻¹ N) with phosphorus application may be an effective restoration measure for degraded alpine steppe, providing a scientific basis for the sustainable management of alpine steppe ecosystem.

Key words: Nitrogen addition; Phosphorus limitation; Alpine steppe; Plant aboveground biomass; Plant species diversity; Community structure

收稿日期:2026-01-08;修回日期:2026-03-09

基金项目:西藏农牧大学研究生创新项目(YJS2025-14);羌塘高原项目(603325037);羌塘科技小院项目(XY2024-02)资助

作者简介:冯探(1996-),男,汉族,江苏连云港人,硕士研究生,主要从事高寒草地生态与保护培育研究,E-mail:1501255948@qq.com;

*通信作者 Author for correspondence, E-mail:xizangsunlei@163.com

高寒草原是青藏高原主要的生态系统,在支撑畜牧业发展和维系区域生态系统服务功能方面具有重要作用^[1-3]。然而,极端自然环境(如低温和干旱)以及不合理的人为干扰活动(如过度放牧)导致高寒草原出现不同程度的退化^[4-5]。因此,如何有效恢复退化高寒草原草地已成为当前高寒草原生态系统管理和可持续利用中亟待解决的核心科学问题^[6-7]。外源氮添加是恢复退化草地生态系统的一种常用人为管理措施^[7-8]。然而,氮添加在促进植物生长的同时,可能导致草地植物多样性下降^[9-11]。因此,明确兼顾生产力提升与生物多样性维持的最佳氮添加浓度是实现高寒草原草地可持续管理的关键。

在退化草地恢复过程中,磷限制可能是制约植物生长的关键因素^[12]。以往的研究表明,适量氮添加可通过促进植物生长以提升退化草地植物地上生物量^[13],而过量氮添加可能导致土壤N:P失衡,使土壤磷供应与植物磷需求之间不匹配,从而不利于植物生长^[14]。此外,单一过量施氮可能不利于草地物种多样性的维持,甚至可能因土壤酸化而产生负面效应^[15]。因此,单独氮添加往往难以满足植物对多种养分的综合需求,进而限制退化草地的有效恢复。高寒草原还受低温、短生长季以及土壤养分矿化速率缓慢等环境条件限制,这可能进一步加剧磷限制效应^[16-17]。而现有研究大多集中在低海拔的高寒草甸,对于高寒草原氮磷耦合机制的研究较少。但是,在高寒草原退化草地恢复过程中,明确自然条件与施磷条件下,不同梯度氮添加对草地生产力和群落结构的影响,对于制定科学合理的管理措施具有重要意义。

本研究以藏北地区高寒草原为研究区,通过对比不同氮添加浓度下植物地上生物量与多样性指数的变化,探究协同恢复退化高寒草原生产力与维持生物多样性的适宜氮添加浓度,为高寒草原生态系统的可持续管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区位于西藏班戈羌塘高寒草地生态系统定位研究站(31°57' N, 89°87' E, 海拔4634 m, 简称羌塘站)。该地区属于典型的高原大陆性气候,年均温和年降雨量分别约为-0.7℃和308.1 mm,其

中月均温>5℃和80%的降水量集中在6-9月^[18]。该区域为典型高寒草原,植被类型以紫花针茅(*Stipa purpurea*)为优势种,主要伴生种包括青藏薹草(*Carex duthiei*)、弱小火绒草(*Leontopodium pusillum*)和矮羊茅(*Festuca coelestis*)等植物,土壤类型为高山草原土。连年过度放牧,导致高寒草原退化严重,土壤养分亏缺。在试验样地布置前通过样方法测得平均盖度为20%,植物地上生物量的平均值为48.1 g·m⁻²。采集0~20 cm深度土壤测得本底数据,pH值为8.35,全氮含量为0.84 g·kg⁻¹,全磷含量为0.26 g·kg⁻¹。

1.2 试验设计

本研究依托西藏羌塘站的养分调控野外试验平台,开展氮、磷添加试验。试验采用完全随机区组设计,共设置12个处理。试验处理包括6个氮素添加梯度(0, 5, 10, 15, 20, 25 g·m⁻²·a⁻¹ N, 其中0为对照处理),以及在各氮素梯度下同步添加磷素的处理,磷素添加量为10 g·m⁻²·a⁻¹ P₂O₅。试验设置6个区组,每个处理随机分配至各区组内的小区。为减少边缘效应并降低不同处理之间相互影响^[19],每个区组面积为83 m×6 m,区组间距为3 m;每个小区面积为6 m×6 m,小区间距为1 m。氮磷添加处理分别在2021与2022年生长季开始前的6月中下旬实施,氮肥选用尿素[CO(NH₂)₂],磷肥使用过磷酸钙[Ca(H₂PO₄)₂·H₂O]。为避免养分挥发,用10 L水将尿素和过磷酸钙溶解,并均匀喷洒于样地小区内土壤表面,对照小区添加等量的水^[20]。

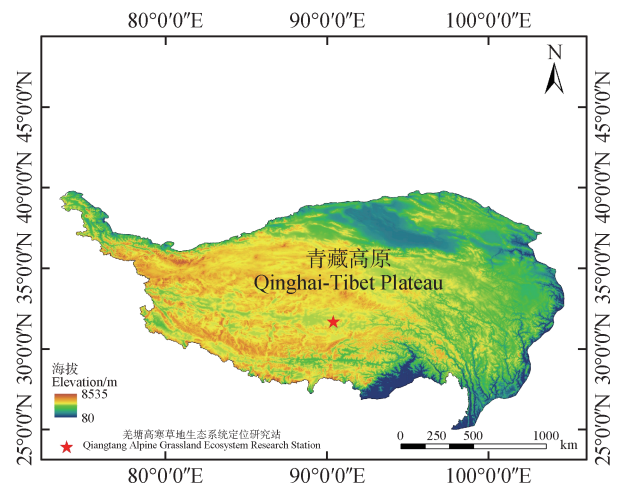


图1 研究点示意图

Fig. 1 Map of the study sites

1.3 野外调查与采样

于2022年8月下旬(植物地上生物量达到最大值),在每个小区随机选取1个0.5 m×0.5 m的样方,共72个样方。详细记录每个样方中物种的基本信息,包括物种名称、物种数量、各物种密度、各物种高度及群落总盖度。调查完成后,将样方内所有植物按物种齐地刈割,装于信封袋带回实验室。植物样品置于65℃烘箱中烘干至恒重称量,即可获得各物种的地上生物量和群落的地上生物量(Aboveground biomass, AGB)。

1.4 数据处理与分析

1.4.1 氮素农学效率的计算 采用氮素农学效率(Agronomic efficiency of applied N, AE_N)来评估氮添加对草地生产力恢复贡献效率^[21],计算公式如下:

$$AE_N = \frac{AGB_{N_i} - AGB_{N_0}}{N_f} \quad (1)$$

式中: AGB_{N_i} 为某施肥处理 N_i 下所获得的地上生物量; AGB_{N_0} 为未施肥处理 N_0 下的地上生物量; N_f 为氮素施用量。

1.4.2 植物物种重要值的计算 采用重要值对每个物种的相对重要性(Relative important value, RIV_i)进行表征,计算公式如下^[22]:

$$RIV_i = \frac{RH_i + RD_i + RF_i}{3} \times 100\% \quad (2)$$

式中,第 i 个物种的重要值 RIV_i 为其相对高度(Relative height, RH_i)、相对密度(Relative density, RD_i)和相对频度(Relative frequency, RF_i)的均值。第 i 个物种的相对高度、相对密度和相对频度分别为该物种对应指标占有所有物种总和的比值。基于此,将物种按功能群划分为禾本科、莎草科和杂类草^[6],并计算各功能群的相对重要值。

1.4.3 植物多样性指数的计算 植物群落多样性采用 Margalef 物种丰富度指数(R)、Shannon-wiener 物种多样性指数(H)、Simpson 指数(D)和 Pielou 物种均匀度指数(E)描述,其计算公式如下^[22-23]:

$$R = \frac{S - 1}{\ln N} \quad (3)$$

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i \quad (4)$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2 \quad (5)$$

$$E = \frac{H}{\ln S} \quad (6)$$

式中, S 表示样方内的物种数量, N 表示样方内各物种的总个体数, P_i 表示第 i 个物种的数量与样方中所有物种个体数量的比值。

1.5 统计分析

采用 SPSS27.0 (SPSS Inc. Chicago, USA) 对不同氮磷添加处理下植物群落的草地恢复力、相对重要值及物种多样性指数进行混合效应模型分析(Mixed-effects model analysis)。其中,将氮添加与磷添加设置为因子变量(固定效应),而将区组设置为随机效应。在混合效应模型分析的基础上,使用 Duncan 多重比较法在 $\alpha=0.05$ 的水平上进行事后检验。所有数据均以“平均值±标准误”表示。采用线性回归比较自然条件与施磷条件下植物地上生物量及多样性指数与氮添加浓度的相关关系。采用 Origin2024 软件(Origin Lab Corp, USA)将所有结果进行可视化。

2 结果与分析

2.1 氮磷添加对植物地上生物量、氮农学效率及功能群重要值的影响

氮添加对植物地上生物量存在显著影响,且与施磷处理之间存在显著交互作用($P<0.05$,表1)。氮添加促进了植物地上生物量的增加,且该促进效应随氮添加浓度升高而增强;在高氮添加浓度($\geq 15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1} \text{ N}$)下,施磷进一步增强这一效应(图2)。氮添加和施磷处理对氮农学效率存在显著影响($P<0.05$,表1)。氮农学效率随氮添加浓度升高呈先降后升的变化趋势,且在各氮添加浓度下施磷均提高了氮农学效率(图3)。

氮添加显著影响各功能群植物的相对重要值,且对禾本科和莎草科而言,其效应与施磷处理存在显著交互作用($P<0.05$,表2)。在低氮浓度($\leq 15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1} \text{ N}$)下,禾本科和莎草科的相对重要值变化不显著;而在高氮添加浓度下,禾本科的相对重要值升高,而莎草科的相对重要值下降。低氮添加浓度下施磷降低禾本科相对重要值,而高氮添加浓度下施磷提高禾本科相对重要值;莎草科则呈现相反的变化趋势(图4)。随着氮添加浓度升高,杂类草的相对重要值逐渐下降,施磷进一步增强了这一负面效应。

表 1 氮添加、施磷处理及其交互作用对高寒草原地上生物量和氮素农学效率的混合效应模型分析

Table 1 Mixed-effects model analysis of the effects of nitrogen addition concentration, phosphorus addition treatments, and their interaction on aboveground biomass (AGB) and agronomic efficiency of applied N (AE_N) in alpine steppe

处理 Treatments	地上生物量 AGB			氮素农学效率 AE_N		
	df	F	P	df	F	P
氮添加浓度 Nitrogen addition concentration	5	822.954	<0.001	4	13.803	<0.001
施磷处理 Phosphorus addition	1	6.324	0.498	1	38.969	<0.001
氮添加浓度×施磷处理 Nitrogen addition concentration×Phosphorus addition	5	17.034	<0.001	4	15.649	0.015

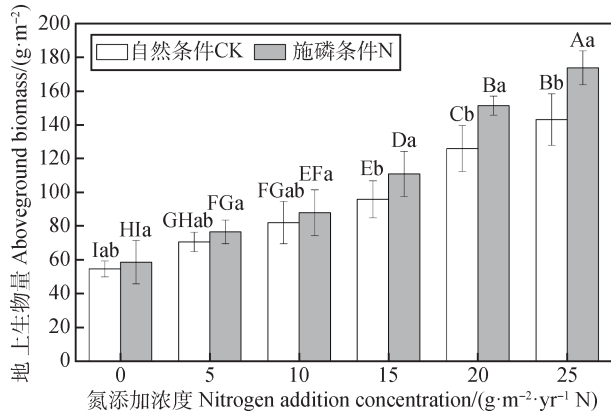


图 2 自然条件和施磷条件下不同氮添加浓度对高寒草原地上生物量的影响

Fig. 2 Effects of different nitrogen addition concentration on aboveground biomass of alpine steppe under ambient and phosphorus addition conditions

注:不同大写字母表示自然条件或施磷条件下不同氮添加浓度之间的差异显著性($P<0.05$);不同小写字母表示相同氮添加浓度下自然条件与施磷条件之间的差异显著性($P<0.05$)。下同

Note: Different uppercase letters indicate significant differences among different nitrogen addition concentrations under ambient and phosphorus addition conditions ($P<0.05$); and different lowercase letters indicate significant differences between ambient and phosphorus addition conditions at the same nitrogen addition level ($P<0.05$). The same as below

表 2 氮添加、施磷处理及其交互作用对高寒草原不同植物功能群相对重要值的混合效应模型分析

Table 2 Mixed-effects model analysis of the effects of nitrogen addition concentration, phosphorus addition treatments, and their interaction on the relative importance values of different plant functional groups in alpine steppe

处理 Treatments	df	禾本科 Grasses		莎草科 Sedges		杂类草 Forbs	
		F	P	F	P	F	P
氮添加浓度 Nitrogen addition concentration	5	33.984	<0.001	7.523	<0.001	20.261	<0.001
施磷处理 Phosphorus addition	1	1.901	0.173	0.043	0.837	2.478	0.121
氮添加浓度×施磷处理 Nitrogen addition concentration×Phosphorus addition	5	3.143	0.014	2.545	0.038	0.192	0.964

2.3 植物地上生物量及多样性指数与氮添加浓度的回归关系

植物地上生物量与氮添加浓度呈显著正相关($P<0.05$),与此相反,植物各多样性指数与氮添加浓度均呈显著负相关($P<0.05$),且施磷条件相比自然条件未改变氮添加浓度与各植物多样性指数

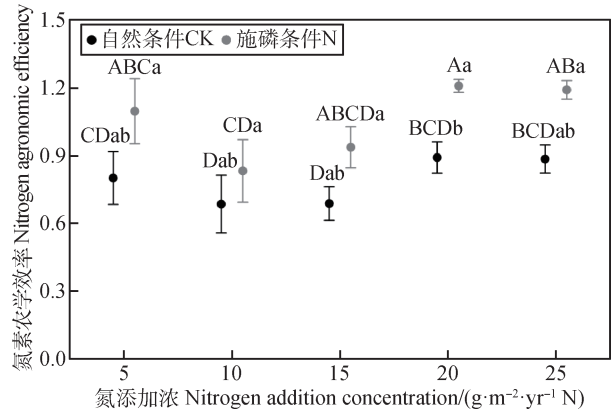


图 3 自然条件和施磷条件下不同氮添加浓度对高寒草原氮素农学效率的影响

Fig. 3 Effects of different nitrogen addition concentration on agronomic efficiency of applied N in alpine steppe under ambient and phosphorus addition conditions

2.2 氮磷添加对植物多样性指数的影响

氮添加对各个植物多样性指数均存在显著影响($P<0.05$),而单独施磷处理对各植物多样性指数均无显著影响(表 3)。在自然条件与施磷条件下,氮添加降低了各个植物多样性指数,且该负效应随氮添加浓度升高而加剧;在同一氮添加浓度,施磷条件下各植物多样性指数均低于自然条件但不显著(图 5)。

的负相关关系(图 6)。在自然条件与施磷条件下,植物地上生物量与氮添加浓度的线性回归关系及各多样性指数与氮添加浓度的线性回归关系,在氮添加浓度 10~15 $g\cdot m^{-2}\cdot a^{-1} N$ 存在交点(图 6),即在该阈值范围内既能促进植物地上生物量,又可维持植物多样性。

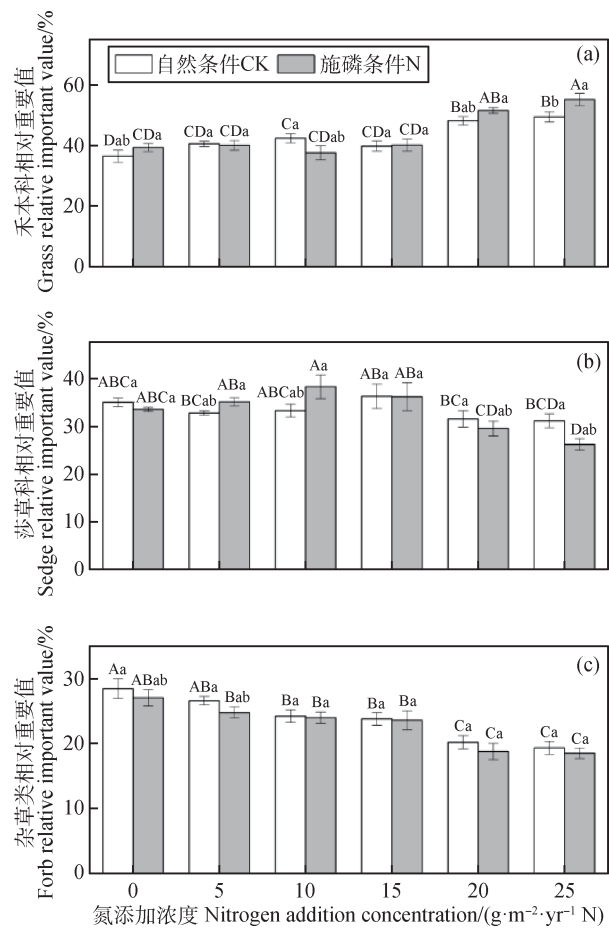


图 4 自然条件和施磷条件下不同氮添加浓度对高寒草原不同植物功能群相对重要值的影响

Fig. 4 Effects of different nitrogen addition concentration on the relative importance values of different plant functional groups in alpine steppe under ambient and phosphorus addition conditions

3 讨论

3.1 氮磷添加对退化高寒草原生物量的影响

氮添加对退化高寒草原恢复成效的影响,在很大程度上依赖于植物地上生物量的响应^[24]。本研究发现,氮添加显著提高了高寒草原植物地上生物

量,主要归因于禾本科植物功能群的重要性增强。禾本科植物通常具有较高的氮利用效率与生长速率,在氮富集条件下其竞争优势增强,从而驱动群落地上生物量的整体增加^[25]。这一结果与青藏高原其他相关研究一致,例如,宗宁等^[15]在藏北退化高寒草地发现,氮添加通过提高禾本科相对生物量占比而促进群落地上生物量的增加;宋珊珊^[17]在青海高寒草地的研究亦表明,氮添加后禾本科植物逐渐成为群落的主要生物量贡献者。同时,本研究发现,地上生物量对氮添加的响应随施氮梯度升高而增强,表明在较高氮水平下,禾本科植物在群落中的优势地位进一步强化,其竞争能力逐渐超过杂类草等其他功能群,从而使群落表现出更强的生物量累积效应^[26]。类似的结果已在多项高寒草地氮添加实验中得到验证^[9,11,13,15]。此外,沿氮添加梯度施磷同样提高了草地地上生物量,这可能是由于磷添加缓解了群落的磷限制,促进了禾本科及其他富氮功能群植物的生长,从而进一步改变了群落结构并增强了氮添加对生产力的促进作用^[27-28]。综上,氮添加主要通过调节群落结构,尤其是提高禾本科植物的重要性,促进高寒草地植物地上生物量的提升,而磷限制的缓解发挥协同增强作用。

退化草地恢复成效不仅取决于植物生物量对氮添加的整体响应,还与其对不同氮添加浓度的敏感性密切相关^[29]。氮素农学效率(AE_N)反映单位施氮量所带来的地上生物量增益,是量化植物生物量对氮添加响应强度、评估氮添加效益的重要指标^[21]。本研究发现,尽管氮添加整体上促进了草地地上生物量的增加,但 AE_N 随氮添加浓度升高呈现出先降低后升高的变化趋势。其可能原因在于,在低氮添加浓度下,随着氮供应的增加,植物生长逐渐受到其他养分或环境因子的限制,氮的边际增益下降,导致 AE_N 降低;而在高氮添加浓度下,群落结

表 3 氮添加、施磷处理及其交互作用对高寒草原植物物种多样性的混合效应模型分析

Table 3 Mixed-effects model analysis of the effects of nitrogen addition concentration, phosphorus addition treatments, and their interaction on the plant species diversity of alpine steppe

处理 Treatments	df	R		H		D		E	
		F	P	F	P	F	P	F	P
氮添加浓度 Nitrogen addition concentration	5	70.860	<0.001	103.155	<0.001	63.675	<0.001	40.407	<0.001
施磷处理 Phosphorus addition	1	8.676	0.092	9.258	0.115	8.234	0.907	7.257	0.363
氮添加浓度×施磷处理 Nitrogen addition concentration×Phosphorus addition	5	3.631	<0.001	1.179	0.329	1.074	0.383	0.963	0.447

注:Margalef物种丰富度指数(R)、Shannon-Wiener物种多样性指数(H)、Simpson指数(D)及Pielou物种均匀度指数(E)

Note: Margalef species richness index (R), Shannon-Wiener species diversity index (H), Simpson index (D), and Pielou species evenness index (E)

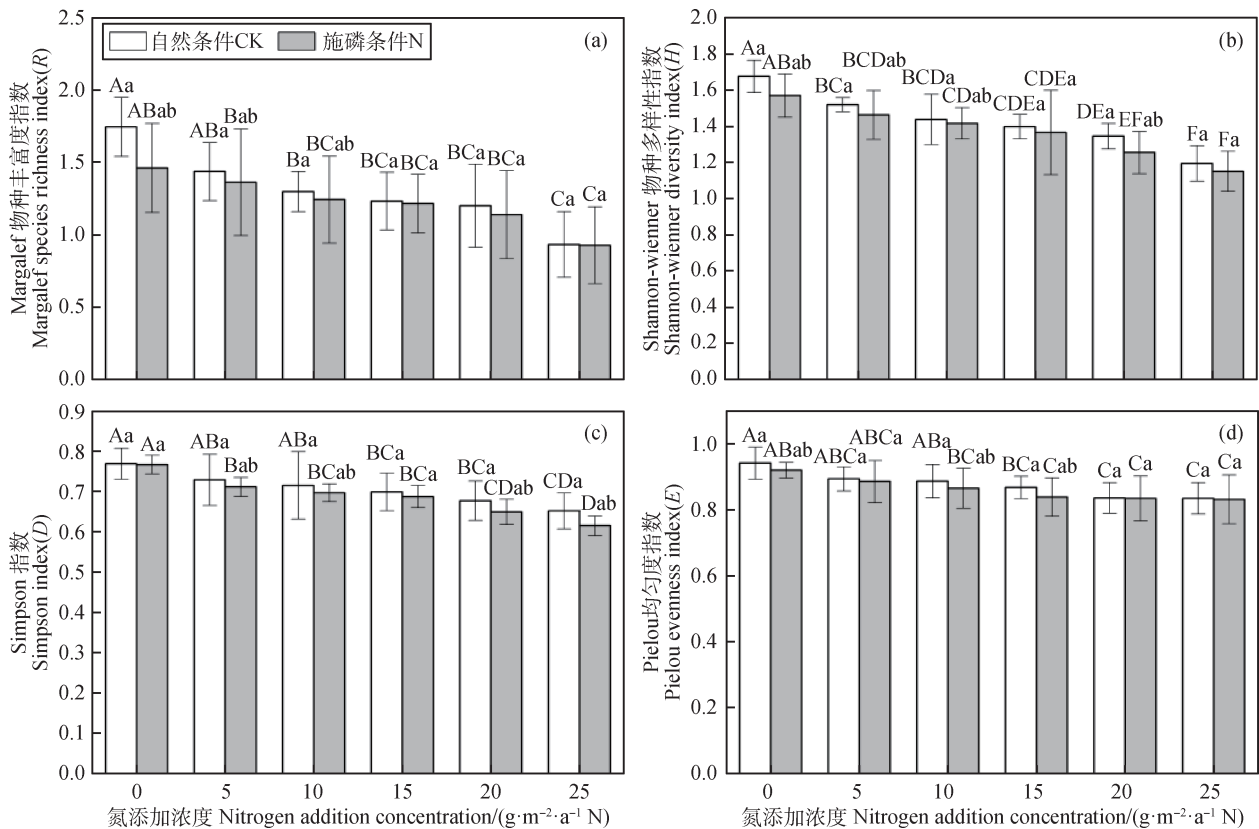


图 5 自然条件和施磷条件下不同氮添加浓度对高寒草原植物多样性的影响

Fig. 5 Effects of different nitrogen addition concentration on the plant species diversity of alpine steppe under ambient and phosphorus addition conditions

构可能发生明显转变,禾本科等高效利用氮的功能群植物占据绝对优势,群落整体氮利用能力增强,使 AE_N 再次回升^[30-31]。此外,本研究发现在各氮添加浓度下施磷均提高了氮农学效率,这表明磷添加缓解了植物生长的磷限制,增强了植物对氮的利用能力,使得单位氮投入能够产生更大的生物量增长^[32-33]。在高寒草地生态系统中,氮添加对生产力的促进效应不仅依赖于氮本身,还受群落结构转变以及磷供应状况的共同调控。合理调控氮磷养分投入及其配比,有助于在退化草地恢复中实现更高效的养分利用与生产力提升。

3.2 氮磷添加对退化高寒草原植物多样性的影响

退化高寒草原的恢复成效不仅依赖于植物生物量的响应,还受到植物多样性维持水平的影响。植物多样性是维持高寒草地生态系统功能的重要基础^[34]。本研究发现,氮添加显著降低了高寒草地植物多样性。这可能是氮添加提高了禾本科植物的相对重要性,同时抑制了其他功能群植物的生长,使群落结构趋向单一化,从而导致植物多样性

下降。这一结果与其他人的研究结果类似,例如, Ren等^[35]在高寒草甸上的研究发现,氮添加反而降低了生物多样性;Hautier等^[36]认为,氮添加促进了草地植物群落中喜氮物种的快速生长,这些物种遮挡了阳光,导致冠层下的其他物种因光照不足而消失,最终降低了群落物种多样性。同时,本研究发现,氮添加对高寒草地植物多样性的负面影响随施氮浓度升高而加剧。张世虎等^[37]的研究结果表明,氮添加一方面增加土壤氮含量,同时也作为酸源,降低土壤pH值,导致土壤酸化,进而影响草地生物多样性;而Maskell等^[38]的研究表明,氮添加引起的土壤酸化可能是降低草地植物群落多样性的主要因素之一。此外,本研究发现施磷未改变氮添加对植物多样性的抑制作用,这可能是因为高寒草原生态系统土壤中有效磷含量较低,氮磷添加彻底打破了土壤中多种养分的相对平衡,使得那些适应贫瘠或特殊养分比例的物种完全失去生存空间^[39]。前人研究表明在磷贫瘠的土壤中添加磷时,可导致某些物种出现叶片衰老与坏死,进而影响群落多样性^[40];刘艳^[41]在青藏高原高寒草甸的研究表明,氮

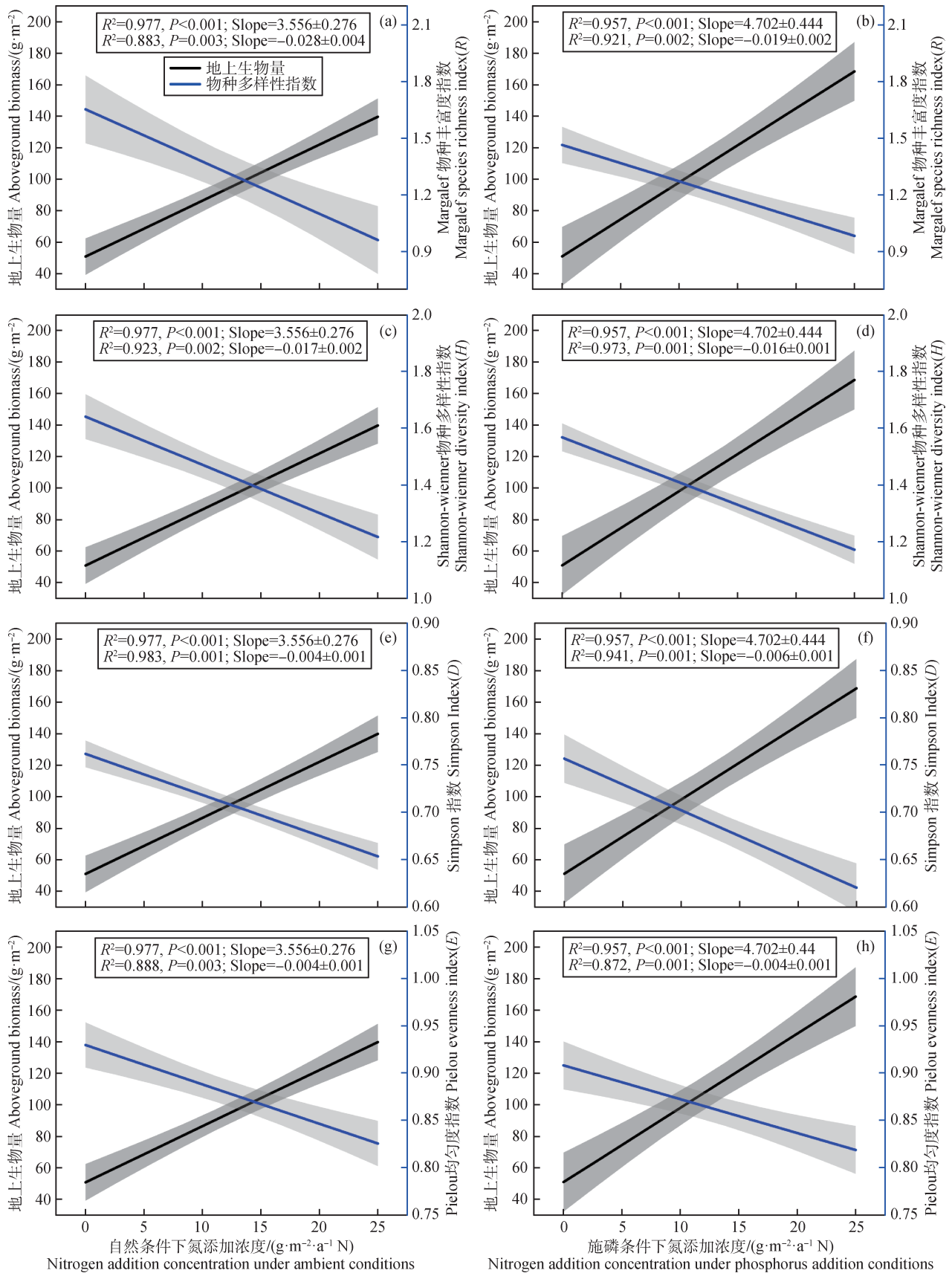


图6 自然条件下与施磷条件下氮添加浓度与地上生物量及物种多样性的线性回归关系

Fig. 6 Linear relationships between nitrogen addition concentration and aboveground biomass and species diversity under ambient and phosphorus addition conditions

磷共同添加可协同降低群落物种多样性指数,使得群落趋于禾草化。适度的氮添加,能在提升生态系统生产力的同时,最大限度地维持其生物多样性和长期稳定性,从而实现生态与生产效益的平衡。

3.3 短期施氮恢复退化高寒草原的有效方案

施氮是退化高寒草原恢复中常用的管理措施,然而如何制定最优施氮策略仍是当前亟待解决的问题。本研究发现,随着氮添加浓度提高,高寒草原植物地上生物量逐渐增加但植物多样性逐渐下降,这表明短期适度氮添加($10\sim 15\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}\text{ N}$)可能是恢复退化高寒草原的有效管理方案。宗宁等^[15]连续四年对重度退化高寒草地进行氮添加的研究表明,植物地上生物量的随氮添加浓度升高而升高,而群落物种数量无显著变化。刘艳^[41]的研究同样表明,适度的氮添加可有助于退化高寒草地恢复:无论单施氮还是氮磷联合施用,均可显著增加植物地上生物量;然而随着氮磷添加浓度升高,生物量呈先增后降趋势,而多样性指数则随浓度升高而下降。此外,本研究表明,施磷可增强氮添加对植物地上生物量的促进作用,但未显著改变氮添加对植物多样性的负面效应,进一步揭示了在退化高寒草地恢复中,氮磷联合施用可在提高生产力的同时保持群落结构相对稳定。

4 结论

本研究通过高寒草原开展有施磷与自然条件下的氮添加短期控制试验,探究了氮添加对退化高寒草原生产力与植物多样性的影响,发现短期氮添加虽显著提升植物地上生物量,但会降低植物多样性。施磷虽进一步增强氮添加对生产力的促进作用,却未能改变其对植物多样性的抑制。该发现揭示了退化生态系统恢复中,生产力提升与多样性维持之间可能存在短期权衡,氮添加缓解了生产力限制,但强化了光竞争,削弱了物种共存基础。单纯以增产为导向的施肥策略存在生态风险,恢复措施需兼顾结构与功能双重目标。本研究识别出在施磷基础上,氮添加浓度为 $10\sim 15\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}\text{ N}$ 时可在一定程度上实现二者平衡,为退化高寒草原短期恢复提供了施氮参考阈值。

参考文献

[1] PIAO S L, TAN K, NAN H J, et al. Impacts of climate and

CO_2 changes on the vegetation growth and carbon balance of Qinghai - Tibetan grasslands over the past five decades [J].

Global and Planetary Change, 2012, 98: 73-80

[2] SUN J, MA B B, LU X Y. Grazing enhances soil nutrient effects: trade-offs between aboveground and belowground biomass in Alpine grasslands of the Tibetan Plateau [J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(2): 337-348

[3] CAO J J, LI G D, ADAMOWSKI J F, et al. Suitable enclosure duration for the restoration of degraded Alpine grasslands on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Land Use Policy, 2019, 86: 261-267

[4] SUN J, LIU M, FU B J, et al. Reconsidering the efficiency of grazing exclusion using fences on the Tibetan Plateau [J]. Science Bulletin, 2020, 65(16): 1405-1414

[5] PENG F, XUE X, YOU Q G, et al. Changes of soil properties regulate the soil organic carbon loss with grassland degradation on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Ecological Indicators, 2018, 93: 572-580

[6] 黄军, 王高峰, 安沙舟, 等. 施氮对退化草甸植被结构和生物量及土壤肥力的影响 [J]. 草业科学, 2009, 26(3): 75-78

HUANG J, WANG G F, AN S Z, et al. Effect of nitrogen fertilization on the vegetation structure and biomass of degraded meadow and soil fertility [J]. Pratacultural Science, 2009, 26(3): 75-78

[7] 胡蓉, 杨洁, 唐庄生, 等. 氮磷添加对草地生态系统土壤碳循环的影响 [J]. 草地学报, 2026, 34(2): 670-678

HU R, YANG J, TANG Z S, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil carbon cycle in grassland ecosystems [J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(2): 670-678

[8] 李禄军, 于占源, 曾德慧, 等. 施肥对科尔沁沙质草地群落物种组成和多样性的影响 [J]. 草业学报, 2010, 19(2): 109-115

LI L J, YU Z Y, ZENG D H, et al. Effects of fertilizations on species composition and diversity of grassland in Keerqin Sandy Lands [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2010, 19(2): 109-115

[9] 杨晓霞, 任飞, 周华坤, 等. 青藏高原高寒草甸植物群落生物量对氮、磷添加的响应 [J]. 植物生态学报, 2014, 38(2): 159-166

YANG X X, REN F, ZHOU H K, et al. Responses of plant community biomass to nitrogen and phosphorus additions in an Alpine meadow on the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(2): 159-166

[10] 黄晶, 刘克思, 洪逸楠, 等. 水分和氮磷添加对不同退化程度草地土壤燕麦生长的影响 [J]. 草地学报, 2025, 33(5): 1355-1362

HUANG J, LIU K S, HONG Y N, et al. Effects of water, nitrogen and phosphorus additions on oat growth in grassland soils with different degradation degrees [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(5): 1355-1362

[11] 张璐璐, 王孝安, 朱志红, 等. 模拟放牧强度与施肥对青藏高原高寒草甸群落特征和物种多样性的影响 [J]. 生态环境学报, 2018, 27(3): 406-415

ZHANG L L, WANG X A, ZHU Z H, et al. The effects of

- simulated grazing intensity and fertilizing on the community characteristics and diversity in Alpine meadow of Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(3): 406-415
- [12] 牛玉斌,余海龙,王攀,等. 氮磷添加对荒漠草原植物群落多样性和土壤C:N:P生态化学计量特征的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(22):8462-8471
- NIU Y B, YU H L, WANG P, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on plant community diversity and soil C:N:P ecological stoichiometry in a desert steppe of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(22):8462-8471
- [13] 周娟娟,刘云飞,王敬龙,等. 短期养分添加对西藏沼泽化高寒草甸地上生物量、植物多样性和功能性状的影响[J]. *草业学报*, 2023, 32(11):17-29
- ZHOU J J, LIU Y F, WANG J L, et al. Effect of short-term nutrient addition on aboveground biomass, plant diversity, and functional traits of swampy Alpine meadow in Tibet[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(11):17-29
- [14] 董六文,任正炜,张蕊,等. 功能多样性比物种多样性更好解释氮添加对高寒草地生物量的影响[J]. *植物生态学报*, 2022, 46(8):871-881
- DONG L W, REN Z W, ZHANG R, et al. Functional diversity rather than species diversity can explain community biomass variation following short-term nitrogen addition in an Alpine grassland[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2022, 46(8): 871-881
- [15] 宗宁,石培礼,牛犇,等. 氮磷配施对藏北退化高寒草甸群落结构和生产力的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(12):3457-3468
- ZONG N, SHI P L, NIU B, et al. Effects of nitrogen and phosphorous fertilization on community structure and productivity of degraded Alpine meadows in northern Tibet, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(12):3457-3468
- [16] 郭剑波,赵国强,贾书刚,等. 施肥对高寒草原草地质量指数及土壤性质影响的综合评价[J]. *草业学报*, 2020, 29(9): 85-93
- GUO J B, ZHAO G Q, JIA S G, et al. Comprehensive evaluation of effects of fertilization on grassland quality index and soil properties in Alpine steppe [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(9):85-93
- [17] 宋珊珊. 长期氮、磷添加对高寒草地植物群落多样性和生物量稳定性的影响[D]. 兰州:兰州大学, 2021:22-30
- SONG S S. Effects of long-term nitrogen and phosphorus addition on plant community diversity and biomass stability in an Alpine grassland [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021: 22-30
- [18] 岳洁. 草原生态补偿政策对西藏班戈县牧民生计的影响研究[D]. 南京:南京农业大学, 2019:17-19
- YUE J. Study on the impact of grassland ecological compensation policy on livelihood of pastoral people in Bangor county, Tibet [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019: 17-19
- [19] 景明慧,贾晓彤,张运龙,等. 长期氮添加对内蒙古典型草原植物地上、地下生物量及根冠比的影响[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(10):3185-3193
- JING M H, JIA X T, ZHANG Y L, et al. Effects of long-term nitrogen addition on community aboveground and belowground biomass and their ratio in a typical steppe of Inner Mongolia[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(10):3185-3193
- [20] 刘红梅,李洁,王丽丽,等. 氮添加对贝加尔针茅草原植物和土壤化学计量特征的影响[J]. *草业学报*, 2018, 27(7):25-35
- LIU H M, LI J, WANG L L, et al. Effects of nitrogen addition on the stoichiometric characteristics of plants and soil in the *Stipa baicalensis* grassland of Inner Mongolia, China[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(7):25-35
- [21] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5):915-924
- ZHANG F S, WANG J Q, ZHANG W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45 (5) : 915-924
- [22] ZHANG Z C, LIU Y, SUN J, et al. Suitable duration of grazing exclusion for restoration of a degraded Alpine meadow on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Catena*, 2021, 207:105582
- [23] AHMAD WANI I, VERMA S, GUPTA R, et al. Nutrient analysis and species diversity of Alpine grasslands: a comparative analysis of less studied biodiversity hotspots[J]. *Sustainability*, 2022, 14(2):887
- [24] ZONG N, SHI P L, SONG M H, et al. Nitrogen critical loads for an Alpine meadow ecosystem on the Tibetan Plateau[J]. *Environmental Management*, 2016, 57(3):531-542
- [25] YAN Y, LU X Y. Is grazing exclusion effective in restoring vegetation in degraded Alpine grasslands in Tibet, China? [J]. *PeerJ*, 2015, 3:e1020
- [26] 戚智彦,吕亚香,刘伟,等. 氮磷养分共同添加促进退化典型草原恢复的机制[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(1):75-82
- QI Z Y, LÜ Y X, LIU W, et al. Mechanism for the restoration of degraded typical steppe by nitrogen and phosphorus co-addition [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34 (1) : 75-82
- [27] 李焕茹,朱莹,田纪辉,等. 碳氮添加对草地土壤有机碳氮磷含量及相关酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(8):2470-2476
- LI H R, ZHU Y, TIAN J H, et al. Effects of carbon and nitrogen additions on soil organic C, N, P contents and their catalyzed enzyme activities in a grassland [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(8):2470-2476
- [28] 马玉寿,郎百宁,李青云,等. 施氮量与施氮时间对小嵩草草甸草地的影响[J]. *草业科学*, 2003, 20(3):47-50
- MA Y S, LANG B N, LI Q Y, et al. Effect of fertilizing nitrogen rate and time on *Kobresia Pygmaea meadow* grassland[J]. *Pratacultural Science*, 2003, 20(3):47-50
- [29] 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
- [30] 王长庭, 王根绪, 刘伟, 等. 施肥梯度对高寒草甸群落结构、功能和土壤质量的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(10): 3103-3113
- WANG C T, WANG G X, LIU W, et al. Effects of fertilization gradients on plant community structure and soil characteristics in Alpine meadow[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(10): 3103-3113
- [31] 罗亲普, 龚吉蕊, 徐沙, 等. 氮磷添加对内蒙古温带典型草原净氮矿化的影响[J]. 植物生态学报, 2016, 40(5): 480-492
- LUO Q P, GONG J R, XU S, et al. Effects of N and P additions on net nitrogen mineralization in temperate typical grasslands in Nei Mongol, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(5): 480-492
- [32] 黄秀声, 黄勤楼, 翁伯琦, 等. 沼液不同氮素水平对狼尾草产量、质量、氮素利用率和土壤剖面硝态氮分布的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(8): 1652-1658
- HUANG X S, HUANG Q L, WENG B Q, et al. Yield, quality and N utilization efficiency of *Pennisetum* and nitrate-N distribution in soil profile as influenced by different N levels of biogas slurry[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(8): 1652-1658
- [33] 卡着才让, 德科加, 徐成体. 不同施肥时间及施氮水平对高寒草甸生物量和土壤养分的影响[J]. 草地学报, 2015, 23(4): 726-732
- DE K J, XU C T. The effects of different fertilizer times and nitrogen levels on biomass and soil nutrients in Alpine meadow[J]. Acta Agrestia Sinica, 2015, 23(4): 726-732
- [34] 杨元合, 张典业, 魏斌, 等. 草地群落多样性和生态系统碳氮循环对氮输入的非线性响应及其机制[J]. 植物生态学报, 2023, 47(1): 1-24
- YANG Y H, ZHANG D Y, WEI B, et al. Nonlinear responses of community diversity, carbon and nitrogen cycles of grassland ecosystems to external nitrogen input[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2023, 47(1): 1-24
- [35] REN Z, LI Q, CHU C, et al. Effects of resource additions on species richness and ANPP in an Alpine meadow community[J]. Journal of Plant Ecology, 2010, 3(1): 25-31
- [36] HAUTIER Y, NIKLAUS P A, HECTOR A. Competition for light causes plant biodiversity loss after eutrophication[J]. Science, 2009, 324(5927): 636-638
- [37] 张世虎, 张悦, 马晓玉, 等. 大气氮沉降影响草地植物物种多样性机制研究综述[J]. 生态学报, 2022, 42(4): 1252-1261
- ZHANG S H, ZHANG Y, MA X Y, et al. Mechanisms underlying loss of plant biodiversity by atmospheric nitrogen deposition in grasslands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4): 1252-1261
- [38] MASKELL L C, SMART S M, BULLOCK J M, et al. Nitrogen deposition causes widespread loss of species richness in British habitats[J]. Global Change Biology, 2010, 16(2): 671-679
- [39] 刘娜娜, 田秋英, 张文浩. 内蒙古典型草原优势种冷蒿和克氏针茅对土壤低磷环境适应策略的比较[J]. 植物生态学报, 2014, 38(9): 905-915
- LIU N N, TIAN Q Y, ZHANG W H. Comparison of adaptive strategies to phosphorus-deficient soil between dominant species *Artemisia frigida* and *Stipa krylovii* in typical steppe of Nei Mongol[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2014, 38(9): 905-915
- [40] LAMBERS H, RAVEN J A, SHAVER G R, et al. Plant nutrient-acquisition strategies change with soil age[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2008, 23(2): 95-103
- [41] 刘艳. 多梯度氮、磷添加对高寒草甸群落结构和生产力的影响[D]. 西宁: 青海大学, 2023: 11-34
- LIU Y. Effects of multi-gradient nitrogen and phosphorus addition on community structure and productivity of Alpine meadow[D]. Xining: Qinghai University, 2023: 11-34

(责任编辑 彭露茜)