

DOI:10.11686/cyxb2025233

http://cyxb.magtech.com.cn

聂莹莹, 徐丽君, 徐修远, 等. 养分添加对科尔沁盐碱化草地植物多样性和地上生物量的影响. 草业学报, 2026, 35(5): 61—71.

NIE Ying-ying, XU Li-jun, XU Xiu-yuan, *et al.* Effects of nutrient addition on plant diversity and aboveground biomass of saline-alkali grassland in Horqin. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(5): 61—71.

养分添加对科尔沁盐碱化草地植物多样性和地上生物量的影响

聂莹莹¹, 徐丽君^{1*}, 徐修远¹, 薛玮², 吴欣珈³, 袁波^{1,4}, 张钊⁵, 张洪志¹, 周琼⁶, 李禹霖⁷

(1. 北方干旱半干旱耕地高效利用全国重点实验室, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 内蒙古呼伦贝尔草原生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100081; 2. 西双版纳傣族自治州气象局, 云南 西双版纳 666199; 3. 深圳市罗湖区银湖实验小学, 深圳 518024; 4. 青岛农业大学资源与环境学院, 山东 青岛 266109; 5. 四川嘉喜生态科技有限公司, 四川 成都 610100; 6. 会泽县农业农村局, 云南 会泽 654200; 7. 鄂温克旗阳波畜牧业发展服务有限公司, 内蒙古 鄂温克 021100)

摘要:为探明养分添加对科尔沁盐碱化草地植物多样性和地上生物量以及二者关系的影响,为盐碱化草地生态系统恢复重建和利用提供理论依据和数据支撑,本研究在科尔沁盐碱化草地进行养分添加试验,设置7个处理,分别为不施肥(CK)、氮肥+菌剂(NG)、氮肥+生物有机肥A(NN)、氮肥+生物有机肥B(NO)、复合肥+菌剂(NPG)、复合肥+生物有机肥A(NPN)、复合肥+生物有机肥B(NPO),采用随机区组设计,分别于每年6月初和8月初进行养分添加试验,研究各养分处理下科尔沁盐碱化草地植物多样性、地上生物量的变化情况。结果表明:1)养分添加处理能不同程度减少植物多样性。与CK相比,复合肥处理(NPG、NPN和NPO)下,Shannon-Wiener指数显著减少了13.55%~25.65%、Pielou指数降低了6.45%~14.68%、Margalef指数显著降低了14.19%~30.24%、Simpson指数降低了3.69%~14.19%;氮肥处理(NG、NN、NO)下,Shannon-Wiener指数减少了3.32%~29.17%、Pielou指数降低了4.99%~9.54%、Margalef指数显著减少了19.35%~32.18%、Simpson指数降低了4.20%~11.64%。2)养分添加处理显著增加了科尔沁盐碱化草地群落地上生物量和禾本科生物量,且复合肥处理促进效应更强,尤其是复合肥+生物有机肥B组合措施,与CK相比,分别提高了74.76%和123.64%($P<0.05$)。豆科与杂类草植物功能群生物量在养分添加后有所降低,但未达到显著性水平。3)在养分添加处理后,Shannon-Wiener指数和Pielou指数与地上生物量之间均呈显著负线性相关关系,Margalef指数和Simpson指数与地上生物量之间负相关关系不显著。外源养分添加显著增加了科尔沁盐碱地群落地上生物量(主要由禾本科植物生物量增加导致),但却不同程度地降低了植物多样性,使得物种多样性与地上生物量之间为负线性相关关系。

关键词:科尔沁盐碱化草地;植物多样性;地上生物量;氮;磷;有机肥

Effects of nutrient addition on plant diversity and aboveground biomass of saline-alkali grassland in Horqin

NIE Ying-ying¹, XU Li-jun^{1*}, XU Xiu-yuan¹, XUE Wei², WU Xin-jia³, YUAN Bo^{1,4}, ZHANG Zhao⁵, ZHANG Hong-zhi¹, ZHOU Qiong⁶, LI Yu-lin⁷

1. State Key Laboratory of Efficient Utilization of Arid and Semi-arid Arable Land in Northern China, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hulunber Grassland Ecosystem National Observation and Research Station, Beijing 100081, China; 2. Meteorological Bureau of Xishuangbanna Dai Autonomous Prefecture, Xishuangbanna 666199, China; 3. Yinhu Experimental Primary School, Luohu District Shenzhen city, Shenzhen 518024, China; 4.

收稿日期:2025-06-10;改回日期:2025-07-10

基金项目:内蒙古自治区科技计划项目(2023YFDZ0019)和国家牧草产业技术体系(CARS-34)资助。

作者简介:聂莹莹(1990—),女,辽宁鞍山人,助理研究员,硕士。E-mail:nieyingying@caas.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: xulijun@caas.cn

College of Resources and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China; 5. Sichuan Jiazhi Ecological Technology Co., Ltd., Chengdu 610100, China; 6. Huize County Agricultural and Rural Bureau, Huize 654200, China; 7. Ewenki Banner Yangbo Animal Husbandry Development Service Co., Ltd., Ewenki 021100, China

Abstract: This study aimed to elucidate the effect of nutrient addition on plant diversity and aboveground biomass in saline-alkali grassland, and to explore the relationship between these two factors. The overall goal of this research was to provide a theoretical foundation and data support for the restoration, reconstruction, and utilization of saline-alkali grassland ecosystems. A field study was conducted in saline-alkali grassland in Horqin. The experiment had a randomized block design, and consisted of a control (no fertilization, CK) and six treatments: nitrogen fertilizer+microbial agent (NG), nitrogen fertilizer+bio-organic fertilizer A (NN), nitrogen fertilizer+bio-organic fertilizer B (NO), compound fertilizer+microbial agent (NPG), compound fertilizer+bio-organic fertilizer A (NPN), and compound fertilizer+bio-organic fertilizer B (NPO). Fertilizer was applied in early June and early August of 2023 and 2024, and a vegetation survey was conducted in mid-August of 2024. The effects of adding different types of nutrients on plant diversity and aboveground biomass in saline-alkali grassland were analyzed. The main results were as follows: 1) All of the nutrient addition treatments reduced plant diversity to some degree. Compared with CK, the compound fertilizer treatments (NPG, NPN, and NPO) resulted in significant decreases in the Shannon-Wiener index by 13.55%–25.65%, the Pielou index by 6.45%–14.68%, the Margalef index by 14.19%–30.24%, and Simpson index by 3.69%–14.19%. Compared with CK, the nitrogen treatments (NG, NN, NO) resulted in significant decreases in the Shannon-Wiener index by 3.32%–29.17%, the Pielou index by 4.99%–9.54%, the Margalef index by 19.35%–32.18%, and Simpson index by 4.20%–11.64%. 2) Nutrient addition treatments significantly increased the aboveground biomass of the community and the biomass of Poaceae in the saline-alkali grassland in Horqin. The combined application of nitrogen and phosphorus had a stronger promoting effect, particularly the combination of compound fertilizer with bio-organic fertilizer B, which increased the aboveground biomass and Poaceae biomass by 74.76% and 123.64%, respectively, compared with CK ($P<0.05$). The biomass of two functional groups (legumes and forbs) decreased after nutrient addition, but the changes were not statistically significant. 3) After nutrient addition, both the Shannon-Wiener index and the Pielou index showed a significant negative linear correlation with aboveground biomass, whereas the Margalef index and Simpson index exhibited non-significant negative correlations with aboveground biomass. Exogenous nutrient addition significantly increased the aboveground biomass of the plant community in saline-alkali grassland in Horqin, primarily driven by the increase in grass family biomass. However, it reduced plant diversity to varying degrees, resulting in a negative linear relationship between species diversity and aboveground biomass.

Key words: Horqin saline-alkali grassland; plant diversity; aboveground biomass; nitrogen; phosphorus; organic fertilizer

草地生态系统约占全球土地面积的25%,占我国国土总面积的41%,贡献了超20%的生产力^[1]。草地生态系统的功能是多方面的。草地的放牧功能满足了人类16%的肉类和乳制品需求^[2];同时草地也具有缓解气候变化、增强粮食安全、保护生物多样性等方面的作用^[3]。但是,近几十年来随着社会对动物源食品需求的增长,草地严重过牧,整个草地生态系统面临着持续性压力^[4]。除此之外,草原生态系统还面临氮沉降、干旱等源自空气污染和气候变化的系统性干扰^[5]。据估计,全球大约1/2的草地已出现不同程度的退化,并且正遭受持续退化的严重威胁,仅2001–2011的10年间,草地退化就造成了约68亿美元的畜牧业经济损失^[6]。在中国,草原生态系统面临更大的压力,过去半个多世纪以来中国90%的草原均出现了不同程度的退化,并且退化面积仍以每年2%的速

度增长,而退化草地的治理速度每年仅为0.2%。近年来,由于国家退耕还草等生态工程项目的实施,草地退化速度得以部分减缓,但总体态势依然比较严重,面临着生产力降低、生物多样性丧失以及生态系统功能退化等多重问题^[7]。草地退化是制约草地实现生产、生态功能的世界性环境问题之一,如何有效恢复退化草地是人类面临的一个巨大的科学与技术挑战。

物种多样性和植物生产力是评估草原生态系统功能和结构的重要指标^[3]。然而,近几十年来,化石燃料的燃烧和化肥使用导致全球范围内的养分富集越来越严重^[8]。养分富集对草地生态系统的影响具有两面性:一方面养分富集可以缓解植物受到的养分限制,在一定程度上有利于提高植物群落的生产力^[9];而另一方面养分富集会打破不同物种间原有的竞争平衡,引起草地群落多样性的丧失^[10]。

氮素(nitrogen, N)是我国北方草原植物生长和初级生产力的主要限制性元素,氮添加不仅影响了植物的生长和繁殖,也影响着草原生态系统的结构和功能。适当的氮添加可以补充土壤养分,缓解植物生长的局限性,促进植物的生长发育^[11]。一些研究表明,外源氮输入能够改变植物群落组成,降低植物多样性^[12],同时氮富集会提高植被生产力^[13]。杨倩等^[14]在内蒙古退化草地的氮添加试验结果显示,氮添加降低了物种多样性,群落地上生物量的增加主要由于外源氮添加显著增加禾本科地上生物量。无独有偶,于丽等^[3]在内蒙古贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*)草原的研究也认为,氮添加降低了草原植物的多样性,但有效提高了草地植物群落初级生产力;研究指出,磷(phosphorus, P)的作用不如氮突出,但也有可能成为主要的限制因子^[15]。Elser等^[16]研究发现,氮和磷共同调控陆地生态系统的群落净初级生产力。除此之外,白雪等^[17]在典型草原以及杨元武等^[18]在高寒草甸的研究结果均表明,群落净初级生产力受到N+P的共同限制。Wang等^[19]对91项关于青藏高原高寒草地施肥的研究进行Meta分析发现,在大部分草地生态系统中,植被生产力更多受到氮磷的共同限制,而不是单一的养分限制。合理、平衡施肥能够提高退化草地植被生产力的观点具有一定的普适性。但施肥过度导致的土壤酸化、营养失衡和生产力降低等严重威胁到草原生态系统功能。以往的研究表明,有机无机肥配施可以显著提高植物的生物量、土壤有机质和氮磷钾养分含量,同时,这些土壤肥力指标的提升可以显著影响植物根系乃至根茬的生物量和养分累积^[20]。

科尔沁草原总面积约 $5.74 \times 10^4 \text{ km}^2$,是我国北方重要的农牧业生产基地^[21]。随着经济发展对生活质量的追求日益强烈,过垦草地和超载放牧现象普遍发生,从而导致草原生态系统稳定性遭到破坏^[22]。具体表现为地表植被覆盖密度显著下降,草本植物群落发生劣变;土壤出现明显的盐渍化现象,同时有机质含量下降,养分保持能力减弱;生态系统的自我调节能力减弱,草地生产力持续下滑,生态服务功能呈现整体性衰减趋势^[23]。这种演替过程体现了植被—土壤系统的恶性循环,最终导致生态系统健康水平的整体降低。草地退化对生态环境和经济社会发展带来双重打击,直接威胁农牧民的生产生活。针对科尔沁沙质盐碱化草地,当前生态治理的关键在于恢复植被覆盖,并建立兼顾生态保护与资源可持续利用的管理模式。

基于此,为了更好地利用和管理盐碱化草地生态系统,本研究以科尔沁盐碱草地为对象,开展无机肥、有机肥配施对草地植物群落生产力及物种多样性影响的研究。基于内蒙古通辽市珠日河定位观测试验平台,连续两年进行多重养分添加试验,主要解析以下问题:1)氮肥+微肥/有机肥、复合肥+微肥/有机肥添加对科尔沁盐碱化草地植物多样性和地上生物量的影响;2)植物多样性与地上生物量的相关关系对养分添加的响应模式。以期对盐碱化草地生态系统的恢复重建与利用提供理论依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于内蒙古自治区通辽市科尔沁左翼中旗珠日河牧场三分场所在区域,东经 121.522° ,北纬 44.196° 。该地属于中温带大陆性气候,春季干旱多风,全年平均温度在 7°C 左右。无霜期为200 d,年日照时数可达到2900 h,降水量为270 mm,主要集中于6—8月。土壤类型主要为碱土和沙土,土壤盐碱化较严重。常见植物主要有羊草(*Leymus chinensis*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)和蒺藜(*Tribulus terrestris*)等。

1.2 试验设计

试验设置对照不施肥(CK)、氮肥(尿素, N含量为46%)、复合肥(硝基磷酸铵, N含量为26%, 磷含量为13%)。为了得到更好的改良效果, 同时配施微生物肥和生物有机肥; 分别为氮肥+菌剂(NG)、氮肥+生物有机肥A(NN)、氮肥+生物有机肥B(NO)、复合肥+菌剂(NPG)、复合肥+生物有机肥A(NPN)、复合肥+生物有机肥B(NPO)7个处理, 每个处理4次重复, 随机区组排列。

小区面积10 m×20 m, 小区之间设1 m过道间隔开, 共28个试验小区。试验开始于2023年, 每年施肥2次, 分别在6月初和8月初进行, 颗粒状肥料一次性均匀撒施。菌剂与生物有机肥配制成溶剂喷施到小区内(每个小区需水15 kg), 具体用量详见表1, 对照小区需要喷施同样水量。为了保证肥效, 试验选择阴雨天进行。

表1 各养分添加用量

Table 1 The amount of nutrient addition

处理 Treatment	无机肥施用量 Inorganic fertilizer application rate (kg·hm ⁻²)	有效活菌数 Viable bacterial count	微肥/有机肥用量 Micronutrient fertilizer/organic fertilizer application rate (kg·hm ⁻²)
CK	0	0	0
NG	200	有效活菌数>50.0亿·g ⁻¹ 。Viable bacterial count>5.0×10 ⁹ CFU·g ⁻¹ 。	15
NN	200	枯草芽孢杆菌0.2亿·g ⁻¹ , 有效活菌数>0.20亿·g ⁻¹ 。Bacillus subtilis: 2.0×10 ⁷ CFU·g ⁻¹ , viable bacterial count: >2.0×10 ⁷ CFU·g ⁻¹ 。	675
NO	200	枯草芽孢杆菌0.2亿·g ⁻¹ , 有效活性菌数>5亿·g ⁻¹ 。Bacillus subtilis: 2.0×10 ⁷ CFU·g ⁻¹ , total viable bacterial count: >5.0×10 ⁸ CFU·g ⁻¹ 。	675
NPG	360	有效活菌数>50.0亿·g ⁻¹ 。Viable bacterial count>5.0×10 ⁹ CFU·g ⁻¹ 。	15
NPN	360	枯草芽孢杆菌0.2亿·g ⁻¹ , 有效活菌数>0.20亿·g ⁻¹ 。Bacillus subtilis: 2.0×10 ⁷ CFU·g ⁻¹ , viable bacterial count: >2.0×10 ⁷ CFU·g ⁻¹ 。	675
NPO	360	枯草芽孢杆菌0.2亿·g ⁻¹ , 有效活性菌数>5亿·g ⁻¹ 。Bacillus subtilis: 2.0×10 ⁷ CFU·g ⁻¹ , total viable bacterial count: >5.0×10 ⁸ CFU·g ⁻¹ 。	675

1.3 研究方法

1.3.1 测定方法 本次野外植被调查在2024年8月中旬进行, 为避免边际效应, 各处理小区内侧留出1 m的隔离带, 随机布设3个1 m×1 m的小样方进行植物群落调查, 并记录每个物种的盖度、多度、高度和地上生物量。由具有丰富经验的野外调查人员现场目测, 估算植被盖度; 多度为同一植物出现的个数(或丛数); 高度由每种植物随机5株的平均值计算, 不足5株测全部; 地上生物量: 将样方内的植物按物种分类齐地面刈割, 装入牛皮纸袋或信封中, 在85℃恒温下烘干12 h至恒重, 称其干重。

1.3.2 计算公式 相关指标计算公式如下:

$$RR = \ln\left(\frac{X_A}{X_B}\right) \quad (1)$$

式中: RR为地上生物量响应比; X_A为处理组的地上生物量; X_B为对照组的地上生物量。

使用重要值(importance value, IV)评估植物群落中植物物种的相对重要性, 计算公式如下:

$$IV = \frac{1}{4} (RC + RH + RD + RB_a) \quad (2)$$

式中: 相对盖度(relative coverage, RC)指某一植物的盖度占有所有植物物种总盖度的百分比; 相对高度(relative height, RH)指某一植物占有所有物种总高度的百分比; 相对密度(relative density, RD)指某一植物密度占有所有物种总密度的百分比; 相对地上生物量(relative aboveground biomass, RB_a)指某一植物地上生物量(aboveground biomass)占有所有物种总地上生物量的百分比。

植物多样性评价使用香农-威纳指数(Shannon-Wiener index)、辛普森指数(Simpson index)、均匀度指数(Pielou index)和物种丰富度指数(Margalef index)表示。这些指数分别由公式(3)至(6)定义,是植物多样性在不同方面的统计表征。

$$\text{Shannon-Wiener指数}(H) = -\sum(P_i \ln P_i) \quad (3)$$

$$\text{Simpson指数}(D) = 1 - \sum(P_i^2) \quad (4)$$

$$\text{Pielou指数}(J) = H/\ln S \quad (5)$$

$$\text{Margalef指数} = (S - 1)/\ln N \quad (6)$$

式中: P_i 为样方内物种*i*的相对重要值, $P_i = B_i/B$; B_i 为物种*i*的重要值; B 为物种*i*所在样方的各个植物种的绝对重要值总和; S 为样方内的物种数; N 为样方内的全部植株数量。

1.4 数据处理

使用Excel 2010整理数据;使用SPSS 19.0进行统计分析,采用单因素分析(One-way ANOVA)、Duncan法进行显著性检验,显著性水平设为 $P < 0.05$ 。为评估养分添加处理下植物多样性与地上生物量的关系,本研究采用了线性混合效应模型,并允许不同处理组具有不同的残差方差。采用Origin 2025进行制图。

2 结果与分析

2.1 植物多样性

各养分添加处理下的 Shannon-Wiener 指数和均匀度指数分别比对照减少了 3.32%~29.17% 和 4.99%~14.68%,其中 NPN 和 NG 处理的 Shannon-Wiener 多样性指数与 CK 之间具有显著差异($P < 0.05$);NPN 处理的均匀度指数与 CK 之间具有显著差异($P < 0.05$);NPN、NPO 和 NG 处理的物种丰富度指数显著低于 CK 处理($P < 0.05$),分别减少了 30.24%、25.30% 和 32.18%;NN 处理下的 Simpson 指数略有增加,另外 5 个养分添加处理使植物的 Simpson 指数降低,与 CK 相比,平均减少了 6.35%,但所有处理间差异未达到显著水平(图 1)。

2.2 地上生物量

2.2.1 群落地上生物量 各养分添加处理对科尔沁盐碱化草地群落地上生物量具有促进作用(图 2)。与 CK

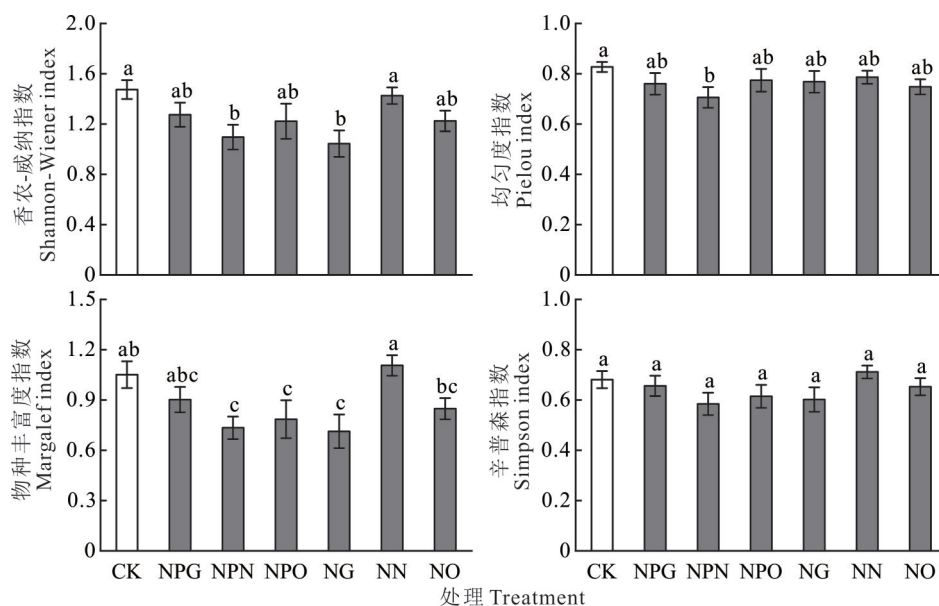


图 1 植物多样性对养分添加的响应

Fig. 1 Response of plant diversity to nutrient addition

不同小写字母表示不同处理之间差异显著($P < 0.05$),下同。Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ($P < 0.05$), the same below.

相比,NG处理的地上生物量提高了21.93%,NN处理提高了20.21%,NO处理显著提高了32.81% ($P < 0.05$)。NPG、NPN和NPO处理显著提高了59.62%~74.76%的地上生物量 ($P < 0.05$)。地上生物量响应比率变化趋势与地上生物量一致,NPG、NPN、NPO处理的响应比高于NG、NN和NO。

2.2.2 功能群生物量 NPG、NPN和NPO处理的禾本科地上生物量与CK相比,分别显著提高了107.40%、106.75%和123.64% ($P < 0.05$);NG、NN和NO处理的禾本科地上生物量与CK相比尽管差异不显著,但也提高了25.12%~43.93%。养分添加处理后,杂类草和豆科植物功能群地上生物量与CK相比均有所降低,分别平均减少了17.83%~55.19%和6.60%~100.00%,与CK之间差异不显著。菊科功能群生物量在NPG和NN处理下与CK相比有所提高,分别增加了19.81%和2.20%,但没有显著差异(图3A)。禾本科地上生物量是科尔沁盐碱化草地群落地上生物量的主体,占比超过总地上生物量的50%(图3B)。

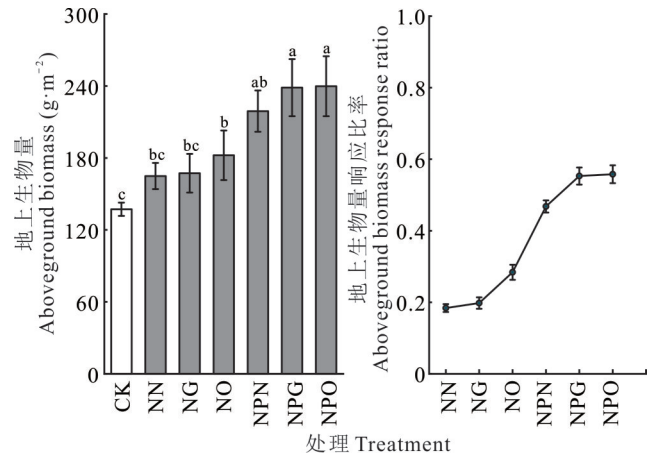


图2 养分添加对群落地上生物量及响应比的影响

Fig. 2 Effects of nutrient addition on community aboveground biomass and its response ratio

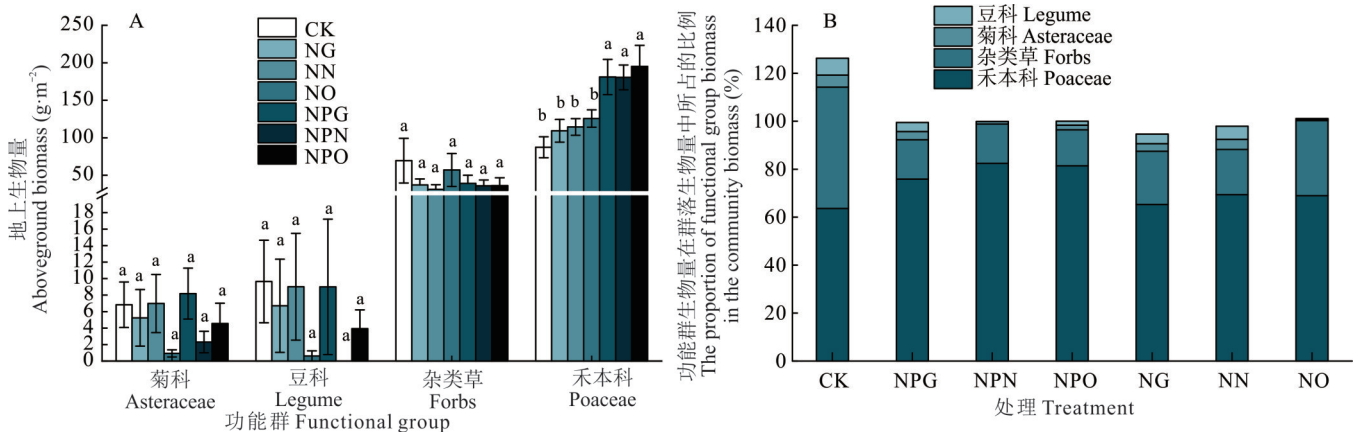


图3 养分添加对群落地上生物量及其功能群生物量占比的影响

Fig. 3 Effects of nutrient addition on community aboveground biomass and the proportion of functional group biomass

2.3 植物多样性与地上生物量之间的关系

线性混合效应模型结果显示(图4),香农-威纳指数—地上生物量和均匀度指数—地上生物量均呈显著负相关;物种丰富度指数—地上生物量和辛普森指数—地上生物量之间相关关系不显著。

进一步分析各处理下植物多样性与地上生物量之间的关系(图5),结果表明:NPG、NPN、NPO和NN处理下的香农-威纳指数—地上生物量、均匀度指数—地上生物量和物种丰富度指数—地上生物量均呈线性负相关关系,其中NPO和NN处理的均匀度指数—地上生物量呈显著线性负相关关系 ($P < 0.05$),相关系数分别为0.676和0.442。NG和NO处理条件下,4种多样性指数与群落地上生物量均呈线性正相关关系,其中NO处理条件下,辛普森指数与地上生物量呈显著线性正相关关系 ($P < 0.05$),相关系数为0.377。

3 讨论

3.1 养分添加对物种多样性的影响机制

有研究表明,大气氮沉降速率每增加 $2.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 会导致 4 m^2 的样方内丢失一个物种^[24]。Clark等^[25]的研究结果也显示长期氮添加显著降低了物种多样性。除此之外,在草甸草原和典型草原的养分添加试验也表明物

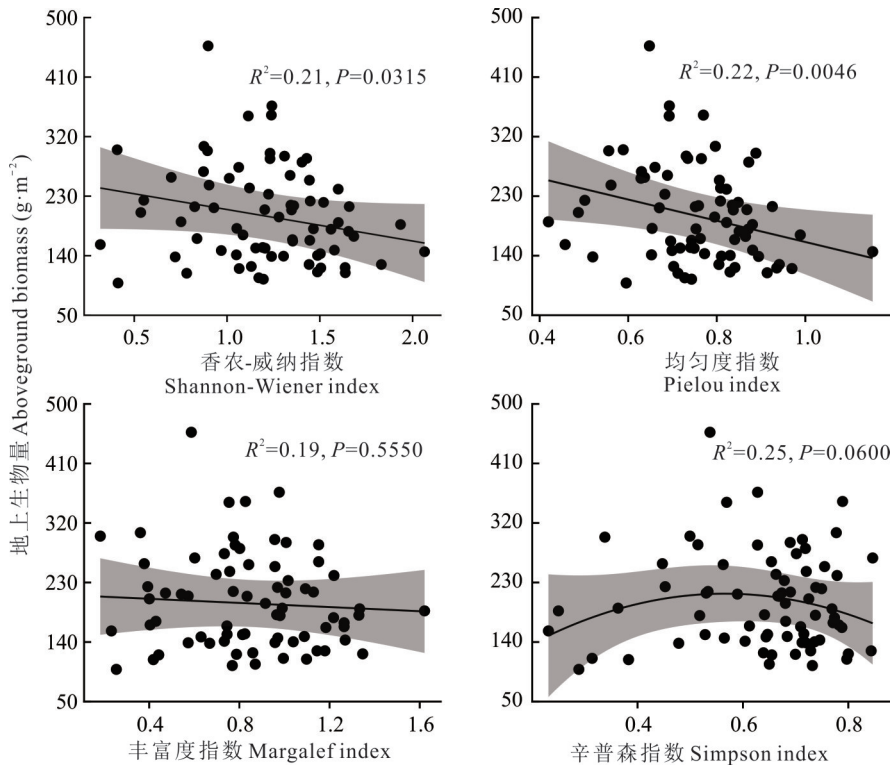


图 4 养分添加处理条件下植物多样性与地上生物量之间的关系

Fig. 4 Relationship between plant diversity and aboveground biomass under nutrient addition treatment

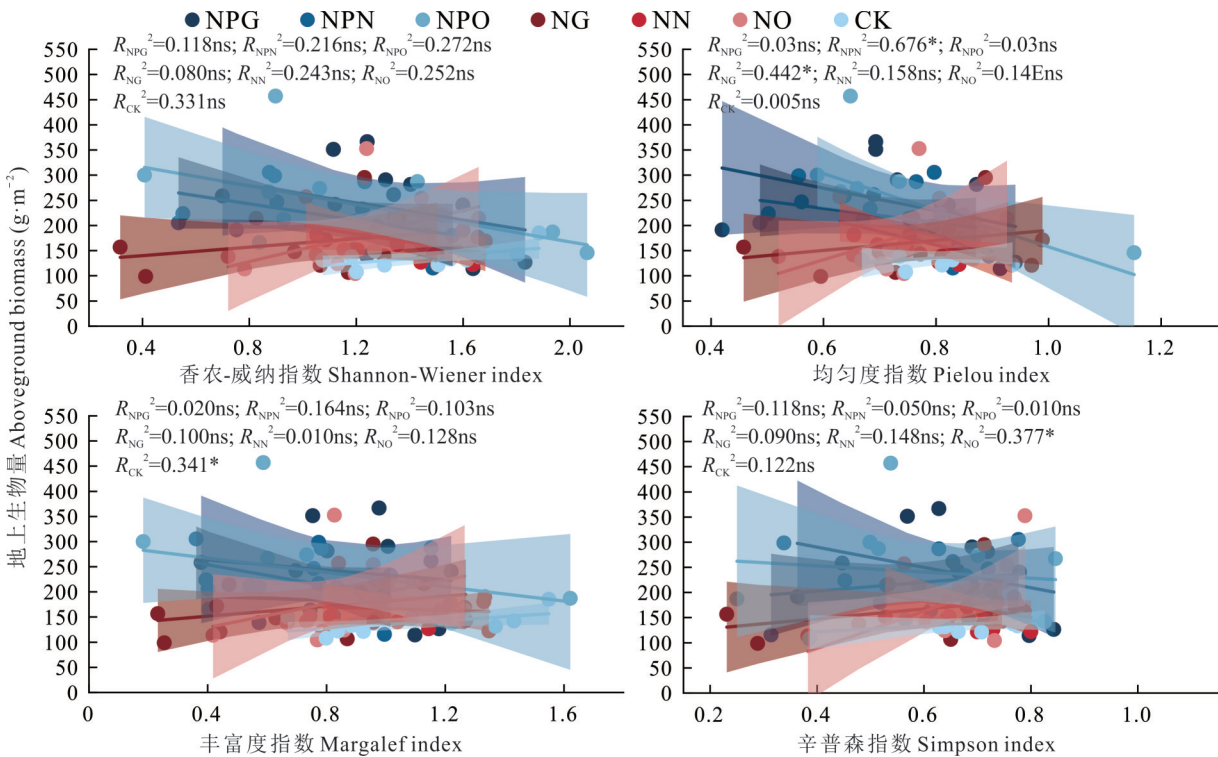


图 5 各养分添加处理下植物多样性与地上生物量之间的关系

Fig. 5 Relationship between plant diversity and aboveground biomass under different nutrient addition treatments

ns 表示相关关系不显著; * 表示相关关系显著。ns represents a non-significant relationship; * represents a statistically significant relationship.

种多样性随着外源氮输入而降低^[3,26]。本研究通过两年的养分添加试验,结果表明,养分添加降低了科尔沁盐碱化草地植物多样性,与对照相比,处理组香农-威纳指数、均匀度指数、物种丰富度指数和辛普森指数分别平均降

低了17.62%、8.50%、19.35%和6.35%。本研究的结果与先前的研究结论相似^[27]。外源氮输入后,能够为喜氮植物(如禾本科植物)的生长提供充足的养分资源,使其快速生长发育,在草地群落中占据主导地位,抑制竞争能力弱的植物种,导致植物多样性降低^[8]。本研究结果表明,添加养分后,禾本科植物的生物量占群落水平地上生物量总量的50%以上,这也验证了前人研究的观点^[8]。植物物种间的竞争机制表明,外源养分的输入提升了土壤中的可利用资源,导致物种间对资源的竞争从地下部分转变为地上部分对光照的竞争^[14],高大植物每单位生物量获取的光资源比低矮植物多,导致低矮植物中对光敏感的物种丢失。Cleland等^[28]认为,氮添加引起的物种间资源趋同限制作用会降低生态位维度并加剧种间竞争,进而导致植物多样性下降。综上所述,外源养分输入导致植物多样性的减少是由多种机制共同调控的。

3.2 科尔沁盐碱化草地群落地上生物量对养分添加的响应机制

研究表明,生物有机肥的施用可显著提升盐碱土中微生物群落丰度,增强硝酸还原酶与脲酶的生物活性,从而有效减少土壤氮素流失,最终实现作物的增产增效^[29]。微生物菌剂具有双重促生机制:一方面通过固氮、解磷等作用直接补充营养元素;另一方面通过合成植物激素(如赤霉素、生长素)改善根际微生态系统,从营养供给和生理调控两个维度协同促进作物生长,最终实现增产效果^[30]。有机肥/菌剂与无机肥的配施可以发挥显著的协同效应^[20]。本研究结果表明,各养分添加条件下均能够提高草地群落地上生物量。其中,NP(NPG、NPO、NPN)添加,与对照相比群落生物量平均显著增加了69.43%;N素添加(NG、NO、NN)下群落生物量平均提高了24.98%。由此可见,NP同时添加正效应更强。这一研究结果与前人研究结论相一致^[15]。进一步研究发现,与CK相比,NG、NN和NO处理的禾本科地上生物量提高了25.12%~43.93%,而NP添加处理的效果更显著,禾本科的地上生物量提高了106.75%~123.64%。这可能是由于禾本科对外源氮输入的利用效率高,并且通常禾本科植物株高较高,如本研究中的羊草、虎尾草(*Chloris virgata*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、芦苇(*Phragmites australis*)等,对光资源的获取更具有优势,进而导致禾本科生物量增加^[31]。另外,禾本科植物的根系发达^[12],在草地生态系统中更具有竞争优势,对N、P养分添加的利用效率更高,对资源的竞争在群落中处于优势地位,能够对养分添加做出快速的响应,生长受到明显的促进,生物量大幅度提升。

杂类草(如蒺藜)一般处于群落下层,在资源竞争中处于劣势。更多的养分资源被群落中占据主导地位的禾本科植物吸收利用,禾本科植物的快速生长使其对下层杂类草的抑制作用增加。而豆科植物因其本身具有的固氮作用,当外源氮输入充分时,禾本科植物对氮的竞争优于豆科植物对磷的竞争^[3]。本研究中,与CK相比,各养分添加处理对杂类草和豆科植物地上生物量,平均分别减少了43.24%和49.40%,但各处理间无显著差异。

3.3 养分调控植物多样性与地上生物量之间的关系

物种多样性是生物多样性在物种水平上的表现,它既体现了生物-生物、生物-环境间的复杂关系,又体现了生物资源的丰富性,被认为对生态系统的生产功能有决定性作用,因而在生物多样性与生产力关系的研究中,物种多样性被广泛使用^[32]。尽管国内外诸多学者对植物多样性与生产力之间的关系做了大量研究,但结果存在差异^[33-35]。诚如Wang等^[36]指出,物种多样性和生产力间存在协同、权衡等多种关系,并在多维资源梯度上呈现出由协同向权衡过渡的特征。处理好物种多样性与生产力两者的关系可以提高草地群落的稳定性以及整个生态系统的可持续性。Guo^[37]的研究表明,演替早期阶段的生态系统生产力-植物多样性呈现正相关关系,晚期阶段的生态系统生产力-多样性又呈现负相关关系,当测量尺度足够大时,在演替的不同阶段生态系统生产力-多样性遵循“驼峰型”关系。Hector等^[38]的研究表明,生态系统生产力与植物物种多样性在局部尺度上呈正相关,而在区域尺度上多样性与生产力的关系则遵循U型或倒U型模式。Dee等^[39]利用来自11个国家43个草原的数据,并借助非生态学领域的方法发现植物多样性与生态系统生产力呈正相关关系。但也有研究认为,物种多样性与草地地上净初级生产力没有显著相关性。另外一项横跨4000 km的中国北方草地样带调查研究发现,多维资源丰富度可以调控植物生产力-多样性关系,从而导致两者间关系具有不确定性^[37]。本研究结果表明,香农-威纳和均匀度指数与地上生物量之间存在显著负线性相关关系,丰富度指数和辛普森指数与地上生物量之间相关性不显著。这与前人的研究结果类似^[3,40]。进一步分析发现,CK处理下的物种多样性与地上生物量之间为正相关关

系,但当输入外源养分时,能够触发物种多样性与地上生物量的关系由正线性相关转变为负线性相关。这可能是因为养分的添加改变了植物群落的生存环境,从而影响了植物多样性与生产力之间的关系,而观测的时间也会导致这种关系发生变化,这些生物或非生物条件的变化是植物多样性与生产力之间的关系出现不同模式的主要原因^[3]。但由于本研究基于短期养分添加观察试验,仅能反映养分添加初期时物种多样性与地上生物量间的关系;由于植物对环境变化的适应性,本研究还需要连续观测更长的时间以分析科尔沁盐碱化草地对长期养分添加的响应规律。

3.4 草地可持续发展

有研究指出,通过对退化或恢复草地的潜在生态系统服务价值的权衡来平衡不同利益群体的需求,以此来促进退化草地的恢复,并保护草地提供的经济、文化和生态效益^[7]。集约化管理的草地如肥料的使用,尽管使植物生产力逐渐提高,但同时植物物种多样性也会降低。这对牧民而言可能是有益的,但关注生物多样性保护的自然资源保护者可能认为草地已经发生了退化^[41]。也就是说,实现退化草地恢复及其可持续发展需要加强多种生态系统服务的协同供应,满足所有利益相关方的需求。本研究中,科尔沁盐碱化草地通过养分添加处理能够实现生产力的显著提升,但多样性有所降低。因此,在利用施肥方式恢复退化草地时,需要综合考量草地的退化状况,同时审慎评估肥料施用对植物多样性和生产力的双重效应,实现生产性能与稳定性之间的平衡。

4 结论

1)短期养分添加能够不同程度的降低物种多样性。其中,NPN和NG处理的香农-威纳指数分别显著减少了25.65%和29.17%,NN处理的均匀度指数显著减少了14.68%,NPN、NPO和NG处理的丰富度指数分别减少了30.24%、25.30%和32.18%,辛普森指数对养分的添加响应不显著。

2)短期养分添加处理显著增加了科尔沁盐碱化草地群落地上生物量和禾本科植物功能群生物量,且NP施促进效应更强,尤其是复合肥+生物有机肥B组合措施(NPO),与CK相比,分别显著提高了74.76%和123.64%($P<0.05$)。且群落生物量的增加主要是禾本科地上生物量的增加导致。

3)短期养分添加处理条件下的香农-威纳指数和均匀度指数与地上生物量之间存在显著负线性相关关系,丰富度指数和辛普森指数与地上生物量之间相关性不显著。

参考文献 References:

- [1] Alberti J, Bakker E S, van Klink R, *et al.* Herbivore exclusion promotes a more stochastic plant community assembly in a natural grassland. *Ecology*, 2017, 98(4): 961–970.
- [2] He M, Pan Y H, Zhou G Y, *et al.* Grazing and global change factors differentially affect biodiversity-ecosystem functioning relationships in grassland ecosystems. *Global Change Biology*, 2022, 28(18): 5492–5504.
- [3] Yu L, Zhao J N, Wang H, *et al.* Effects of nutrient addition on plant diversity and productivity in a *Stipa baicalensis* grassland in Inner Mongolia, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(24): 8165–8173.
于丽, 赵建宁, 王慧, 等. 养分添加对内蒙古贝加尔针茅草原植物多样性与生产力的影响. *生态学报*, 2015, 35(24): 8165–8173.
- [4] Bai Y F, Cotrufo M F. Grassland soil carbon sequestration: Current understanding, challenges, and solutions. *Science*, 2022, 377(6606): 603–608.
- [5] Luo W T, Shi Y, Wilkins K, *et al.* Plant traits modulate grassland stability during drought and post-drought periods. *Functional Ecology*, 2023, 37(10): 2611–2620.
- [6] Bardgett R D, Bullock J M, Lavorel S, *et al.* Combatting global grassland degradation. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(10): 720–735.
- [7] Han X, Li Y H, Du X F, *et al.* Effect of grassland degradation on soil quality and soil biotic community in a semi-arid temperate steppe. *Ecological Processes*, 2020, 9(1): 1–11.
- [8] Yang Y H, Zhang D Y, Wei B, *et al.* Nonlinear responses of community ecosystems to external nitrogen input diversity, carbon and nitrogen cycles of grassland. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2023, 47(1): 1–24.
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. *植物生态学报*, 2023,

47(1): 1–24.

- [9] Zhao Y N, Yang B, Li M X, *et al.* Community composition, structure and productivity in response to nitrogen and phosphorus additions in a temperate meadow. *Science of the Total Environment*, 2019, 654: 863–871.
- [10] Niu D C, Yuan X B, Cease A J, *et al.* The impact of nitrogen enrichment on grassland ecosystem stability depends on nitrogen addition level. *Science of the Total Environment*, 2018, 618: 1529–1538.
- [11] Xu Y F, Shen Y Z, Zhang W T, *et al.* Control of nitrogen leaching and ammonia volatilization by developing a kind of humic acid-matrix slow release urea. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(4): 801–811.
徐宇帆, 申亚珍, 张文太, 等. 腐植酸基质缓释尿素对氮素淋失和氨挥发的阻控. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(4): 801–811.
- [12] Bai Y F, Wu J G, Clark C M, *et al.* Tradeoffs and thresholds in the effects of nitrogen addition on biodiversity and ecosystem functioning: Evidence from Inner Mongolia grasslands. *Global Change Biology*, 2020, 16(1): 358–372.
- [13] Wang K L, Yang H L, Xiao H, *et al.* Effects of nitrogen application and clipping height on vegetation productivity and plant community composition of haying meadow steppe. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(13): 2625–2636.
王开丽, 杨合龙, 肖红, 等. 施氮与刈割留茬高度对草场生产力及植物群落组成的影响. *中国农业科学*, 2020, 53(13): 2625–2636.
- [14] Yang Q, Wang W, Zeng H. Effects of nitrogen addition on the plant diversity and biomass of degraded grasslands of Nei Mongol, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, 42(4): 430–441.
杨倩, 王妮, 曾辉. 氮添加对内蒙古退化草地植物群落多样性和生物量的影响. *植物生态学报*, 2018, 42(4): 430–441.
- [15] Wang H Y, Chang J F, Wang Z W. Responses of community species diversity and productivity to nitrogen and phosphorus addition during restoration of degraded grassland. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(13): 2604–2613.
王洪义, 常继方, 王正文. 退化草地恢复过程中群落物种多样性及生产力对氮磷养分的响应. *中国农业科学*, 2020, 53(13): 2604–2613.
- [16] Elser J J, Brachen M E S, Cleland E E, *et al.* Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 2007, 10(12): 1135–1142.
- [17] Bai X, Cheng J H, Zheng S X, *et al.* Ecophysiological responses of *Leymus chinensis* to nitrogen and phosphorus additions in a typical steppe. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, 38(2): 103–115.
白雪, 程军回, 郑淑霞, 等. 典型草原建群种羊草对氮磷添加的生理生态响应. *植物生态学报*, 2014, 38(2): 103–115.
- [18] Yang Y W, Zhou H K, Li X L, *et al.* Initial response of species diversity and productivity to nutrients addition on alpine meadow. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2017, 26(2): 159–166.
杨元武, 周华坤, 李希来, 等. 高寒草甸物种多样性和生产力对养分添加的初期响应. *西北农业学报*, 2017, 26(2): 159–166.
- [19] Wang D J, Zhou H K, Yao B Q, *et al.* Effects of nutrient addition on degraded alpine grasslands of the Qinghai-Tibetan plateau: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 301(10): 106970.
- [20] Liu K L, Zhang H M, Han T F, *et al.* Effects of long-term application of chemical and organic fertilizers on root biomass and nutrient in double cropping rice system. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(18): 3540–3548.
柳开楼, 张会民, 韩天富, 等. 长期化肥和有机肥施用对双季稻根茬生物量及养分积累特征的影响. *中国农业科学*, 2017, 50(18): 3540–3548.
- [21] Zhang T H, Cong A Q, Lian J, *et al.* Thinking from Horqin Grassland to Horqin Sandy Land. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(1): 25–30.
张铜会, 丛安琪, 连杰, 等. 从科尔沁草原到科尔沁沙地的思考. *应用生态学报*, 2024, 35(1): 25–30.
- [22] Wu C. Response of litter decomposition to different restoration measures in Horqin saline-alkali grassland. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.
吴朝. 科尔沁盐碱化草地枯落物分解对不同修复措施响应. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- [23] Wang D L. Effects of fertilizer application on the characteristics of vegetation functional groups and soil physicochemical properties in degraded grasslands of Horqin. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.
王东磊. 施肥对科尔沁退化草地植被功能群特征及土壤理化性质的影响. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
- [24] Stevens C J, Dise N B, Mountford J O, *et al.* Impact of nitrogen deposition on the species richness of grasslands. *Science*, 2004, 303(5665): 1876–1879.
- [25] Clark C M, Tilman D. Loss of plant species after chronic low-level nitrogen deposition to prairie grasslands. *Nature*, 2008,

- 451(7179): 712–715.
- [26] 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. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(12): 3458–3468.
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. *应用生态学报*, 2014, 25(12): 3458–3468.
- [27] Pan Z Z, Wang R B, Chen H, *et al.* Response of aboveground productivity to nutrient addition driven by species diversity in an alpine meadow community. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(4): 1865–1877.
潘珍珍, 王瑞兵, 陈欢, 等. 物种多样性驱动高寒草甸地上生产力对养分添加的响应. *生态学报*, 2025, 45(4): 1865–1877.
- [28] Cleland E E, Harpole W S. Nitrogen enrichment and plant communities. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2010, 1195(1): 46–61.
- [29] Si H L, Ji L D, Li L, *et al.* Effects of long-term application of bioorganic fertilizer on soil nutrients and biological characteristics of saline alkali land in Ningxia. *Soils*, 2022, 54(6): 1124–1131.
司海丽, 纪立东, 李磊, 等. 生物有机肥对宁夏盐碱地土壤养分和生物学特性的影响. *土壤*, 2022, 54(6): 1124–1131.
- [30] Lu P N, Liu J H, Zhao B P, *et al.* Effects of microbial fertilizer on soil characteristics and root exudates of oats in saline-alkali land. *Crops*, 2017(5): 85–92.
卢培娜, 刘景辉, 赵宝平, 等. 菌肥对盐碱地土壤特性及燕麦根系分泌物的影响. *作物杂志*, 2017(5): 85–92.
- [31] 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. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, 38(2): 159–166.
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. *植物生态学报*, 2014, 38(2): 159–166.
- [32] Flynn D F, Mirotchnick N, Jain M, *et al.* Functional and phylogenetic diversity as predictors of biodiversity–ecosystem–function relationships. *Ecology*, 2011, 92(8): 1573–1581.
- [33] Li D, Nie Y Y, Xu L J, *et al.* Enclosure in combination with mowing simultaneously promoted grassland biodiversity and biomass productivity. *Plants*, 2022, 11(15): 2037.
- [34] Nie Y Y, Xu L J, Xin X P, *et al.* Long-term grassland diversity-productivity relationship regulated by management regimes in northern China. *Science of the Total Environment*, 2024, 949: 175084.
- [35] Lasky J R, Uriarte M, Boukili V K, *et al.* The relationship between tree biodiversity and biomass dynamics changes with tropical forest succession. *Ecology Letters*, 2014, 17(9): 1158–1167.
- [36] Wang Y F, Du J Q, Pang Z, *et al.* Unimodal productivity-biodiversity relationship along the gradient of multidimensional resources across Chinese grasslands. *National Science Review*, 2022, 9(12): nwac165.
- [37] Guo Q. Temporal species richness-biomass relationships along successional gradients. *Journal of Vegetation Science*, 2003, 14(1): 121–128.
- [38] Hector A, Bagchi R. Biodiversity and ecosystem multifunctionality. *Nature*, 2007, 448(7150): 188–190.
- [39] Dee L E, Ferraro P J, Severev C N, *et al.* Clarifying the effect of biodiversity on productivity in natural ecosystems with longitudinal data and methods for causal inference. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 2607.
- [40] Ren Z W, Li Q, Chu C J, *et al.* Effects of resource additions on species richness and ANPP in an alpine meadow community. *Journal of Plant Ecology*, 2010, 3(1): 25–31.
- [41] Allan E, Manning P, Alt F, *et al.* Land use intensification alters ecosystem multifunctionality via loss of biodiversity and changes to functional composition. *Ecology Letters*, 2015, 18(8): 834–843.