

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.07.021

引用格式:董雯雯,陈丽娟,张瑞轩,等.翻耕与养分添加对高寒草甸植物群落多样性及生物量的影响[J].草地学报,2026,34(7):2579–2591

DONG Wen-wen, CHEN Li-juan, ZHANG Rui-xuan, et al. Effects of Plowing and Nutrient Addition on Plant Community Diversity and Biomass in Alpine Meadows[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(7):2579–2591

翻耕与养分添加对高寒草甸植物群落多样性 及生物量的影响

董雯雯,陈丽娟,张瑞轩,王一鸣,岳磊,杨健,孙浩,周杰,薛凌宇,
孟天乐,文爱芳,陈广军,马晶,张晓娟,陈先敏,白宇杰,杨洁,唐庄生*
(甘肃农业大学草业学院,甘肃兰州730070)

摘要:翻耕和施肥是高寒草甸的常见管理措施,直接影响植物生产力和物种多样性。本研究在甘肃农业大学天祝高山草原生态系统试验站设置翻耕(Dis)、养分添加(NPK)及二者交互处理(DisNPK)的实验样地,以自然草地为对照(CK)。通过测定土壤理化性质、植物生物量及物种多样性,分析土壤理化性质与植被生物量及物种多样性之间的关系,探究翻耕与养分添加对高寒草甸植物群落结构及生物量的影响,并探明其关键驱动因子。结果表明:所有处理均显著提高了土壤全效和速效养分含量;NPK处理显著提高了地上生物量,当翻耕与施肥结合(DisNPK)时,对生产力(特别是禾本科与总生物量)的提升效果最显著;Dis和DisNPK处理显著降低了群落多样性。相关性分析显示,土壤速效养分和有机质与地上生物量正相关,而与多样性指数负相关($P<0.05$)。本研究表明翻耕及养分添加会影响生态系统的群落结构和生产力,为高寒草甸生态修复提供理论依据。

关键词:高寒草甸;翻耕;养分添加;植物多样性;土壤理化性质

中图分类号:Q948.1

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)07-2579-13

Effects of Plowing and Nutrient Addition on Plant Community Diversity and Biomass in Alpine Meadows

DONG Wen-wen, CHEN Li-juan, ZHANG Rui-xuan, WANG Yi-ming, YUE Lei, YANG Jian,
SUN Hao, ZHOU Jie, XUE Ling-yu, MENG Tian-le, WEN Ai-fang, CHEN Guang-jun, MA Jing,
ZHANG Xiao-juan, CHEN Xian-min, BAI Yu-jie, YANG Jie, TANG Zhuang-sheng*
(College of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu Province 730070, China)

Abstract: Plowing and fertilization are common management practices in alpine meadows, which directly influence plant productivity and species diversity. This study established experimental plots with plowing (Dis), nutrient addition (NPK), and their interactive treatment (DisNPK) at the Tianzhu Alpine Grassland Ecosystem Experimental Station of Gansu Agricultural University, with natural grassland as a control (CK). The objectives were to investigate the effects of plowing and nutrient addition on plant community structure and biomass in alpine meadows and to identify the key driving factors. By measuring soil physicochemical properties, plant biomass, and species diversity, we analyzed the relationships between soil physicochemical properties and vegetation biomass/species diversity. The results showed that all treatments significantly increased the contents of total and available soil nutrients compared to control. The NPK treatment significantly increased above-ground biomass, and the combined effect of plowing and fertilization (DisNPK) had the most significant enhance-

收稿日期:2025-11-27;修回日期:2026-02-26

基金项目:国家自然科学基金(32360345);甘肃农业大学伏羲青年英才(GAUfx-04Y06);甘肃省杰出青年基金(24JRRA632);中国农业大学对口支援项目(GSAU-DKZY-2024-004)资助

作者简介:董雯雯(2002-),女,汉族,甘肃兰州人,硕士研究生,主要从事草地生态研究,E-mail:dongww2024@163.com;*通信作者
Author for correspondence, E-mail: tangzs@gsau.edu.cn

ment on productivity (particularly for grasses and above-ground biomass). The Dis and DisNPK treatments significantly reduced community diversity. Correlation analysis revealed that soil available nutrients and organic matter were positively correlated with above-ground biomass but negatively correlated with diversity indices ($P < 0.05$). This study demonstrates that plowing and nutrient addition can alter the community structure and productivity of the ecosystem, providing a theoretical basis for the ecological restoration of alpine meadows.

Key words: Alpine meadow; Plowing; Nutrient Addition; Plant diversity; Soil physicochemical properties

青藏高原被誉为“地球第三极”和“亚洲水塔”^[1-2]。高寒草甸是青藏高原面积最大的草地类型,高寒草甸具有水源涵养、碳汇调节、牧业生产和生物多样性维持等重要功能^[3-4],但因其生态系统较为脆弱,对人为干扰(如过度放牧)高度敏感^[5-7]。近年来,在全球气候变化和人为干扰下,高寒草甸退化形势严峻,通过施肥补充养分是常见的生态修复手段。然而,外源养分输入可能引发植物多样性下降、种间竞争关系改变及土壤微生物群落扰动等生态风险。据最新数据调查,青藏高原退化草地面积依旧较大,约30%的高寒草甸已经出现不同程度的退化^[8]。2016—2020年间青藏高原草地退化面积占比为24.3%,主要分布在低海拔、高植被覆盖度区域^[9];西藏自治区草原退化面积约占全区草原面积的29.4%,其中重、中度退化草地约达到8.67万km²^[10]。这主要源于气候变化与人类活动的叠加影响,如过度放牧、翻耕、养分富集等^[11]。因此,了解翻耕和养分富集对高寒草甸生态系统的具体影响,对于高寒草地生态管理和科学调控具有重要意义。

翻耕(Plowing)作为一种常见的干扰形式,显著影响植被、土壤物理化学性质以及土壤微生物群落的结构和功能^[12]。翻耕对生态系统的影响利弊共存。一方面,其通过减小土壤紧实度、优化水肥条件,显著促进根系的生长发育^[13-14]。另一方面,其作为人为干扰,过度使用会损坏土壤结构和微生境,导致土壤有机质流失、微生物群落结构失衡,甚至加剧土壤侵蚀^[15]。

施肥是影响草地群落结构及功能的另一个主要因素。外源性养分的输入也可能引发一系列生态风险,如植物多样性下降、种间竞争关系改变,以及土壤微生物群落结构和功能基因的扰动^[16-17],进而影响生态系统的稳定性和持续性^[18]。随着人类活动的增加,氮、磷、钾等关键元素的过量输入导致生态系统富营养化^[15]。因此在高寒草甸生态系统中,养分添加(Nutrient addition)成为研究人类活动对生态系统影响的重要方面。主要植物营养元素包括氮(N)、磷(P)和钾(K),这些元素通过不同形式(如NP、NK、PK、NPK等组合)参与植物生长调控^[19-20],对维持植物生长和生态系统功能至关重要^[21-23]。然而,针对高

寒草甸生态系统(如青藏高原地区)开展的研究发现:养分输入会改变植物群落的组成和结构,例如,土壤中含有较高的氮、磷元素时,会加速促进禾本科等速生植物的优势,最终导致群落结构简化,而且群落中各功能群植物所受限制养分不同,青藏高原高寒草甸植物生长趋向于氮磷共同限制^[24]。因此,过度的养分输入,特别是氮和磷的过量施用,反映了人类活动导致的富营养化问题。

翻耕与养分添加在草地管理中常同时发生,两者可能存在交互效应:翻耕改变了土壤理化特性和空间异质性,而富营养化改变了植物物种在环境变化中植物资源利用策略(即植物物种异步性)。正如Carroll等^[18]所指出的,养分化合物的输入会改变种间关系,氮、磷等关键营养元素通过降低物种对环境波动的响应差异(即异步性)从而产生显著的“去稳定化”效果。因此,两者的结合有可能协同作用,改善草地的群落结构和功能,提升草地的生物量和生产力。然而,翻耕与养分添加的联合处理也可能带来复杂的生态反应,特别是在高寒草甸这一特殊环境中,过度的翻耕和养分富集可能导致群落结构简化和生态功能下降^[25-27]。因此,合理的管理措施需要综合考虑草地生态系统的脆弱性,避免单一干预带来的负面效应。

然而,目前研究多聚焦于单一干扰(如单纯放牧或施肥)的生态效应,对于翻耕(物理干扰)与养分添加(化学干扰)这一在草地管理中常同时发生、且可能产生复杂交互作用的复合驱动因子,如何共同影响高寒草甸植物生物量与土壤理化性质的内在机制尚不明确。因此,本研究以高寒草甸为对象,设置翻耕、养分添加及其交互处理,旨在揭示翻耕与养分添加的单独及交互效应,阐明物理干扰与养分添加协同作用下生物量的变化规律,识别驱动高寒草甸生物量及物种多样性响应的关键因子,从而为高寒草甸生态系统保护提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于甘肃省天祝藏族自治县抓喜秀龙乡

境内甘肃农业大学天祝高山草原生态系统试验站(37°12'N, 102°46'E), 海拔 2937 m。该区域属于典型的高原大陆性气候, 年平均降水量为 416.0 mm, 年均气温为 -0.1℃, 具有冬季漫长、夏季短暂且季节温差显著的气候特征。土壤类型以亚高山草甸土和亚高山黑钙土为主。研究区植被类型为高寒草甸, 优势种为矮生嵩草(*Kobresia humilis*), 主要伴生种包括垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、线叶嵩草(*K. capillifolia*)和鹅绒委陵菜(*Potentilla anserina*)等。该区域冬季实行放牧管理, 研究区面积为 8 hm², 放牧强度为 8.57 羊单位·hm⁻²。

1.2 试验设计

本研究样地共布设 12 个实验小区, 每个小区面积为 5 m×5 m, 小区之间以 1 m 宽走道分隔, 以

减少相互干扰。每个小区进一步划分为 4 个面积为 2 m×2 m 的样方。每个样方内固定布设 4 个 1 m×1 m 的子样方, 选取其中一个子样方为取样区, 其他子样方以备未来使用, 如图 1-A 所示。如图 1-B 所示, 对小区分别施加以下 4 种处理, 每种处理设 3 次重复(即 3 个小区)。具体处理如下:

(1) 对照组(Control): 不进行任何人为干预, 保持土壤与植被的自然状态;

(2) 长期养分添加(NPK_μ): 每年 5 月按 10 g·m⁻² 的施用量施加氮肥(尿素)、磷肥(重过磷酸钙)和钾肥(硫酸钾);

(3) 翻耕(Plowing): 每年 10 月下旬进行人工翻土深度为 20 cm, 清除土壤中的植物根系;

(4) 养分添加与翻耕结合处理(Plowing+NPK_μ): 在同一小区内同时实施养分添加和物理扰动处理。

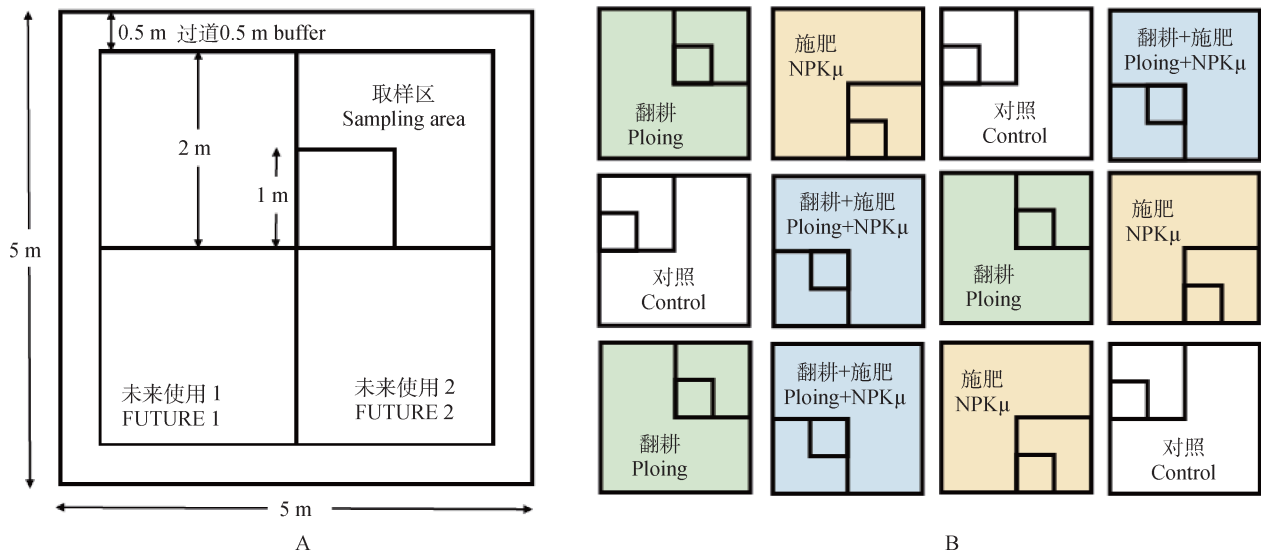


图1 实验设计图

Fig. 1 Experimental design diagram

注: 下文将以 CK, NPK, Dis, DisNPK 分别代指上述四种处理

Note: In the following text, the four treatments will be denoted by the abbreviations CK, NPK, Dis, and DisNPK, respectively

1.3 调查指标

1.3.1 植物群落调查 对子样方内的植物进行调查, 记录各物种名称及盖度, 并统计样方内植物物种总数。

1.3.2 土壤化学性质测定 在植物群落调查样点附近约 10 cm 处, 采用直径 3.8 cm 的土钻采集 0~20 cm 表层土壤样品。样品经自然风干后除去石块与植物残体, 并通过 2 mm 筛备用。有机碳(Organic carbon, SOC)、全氮(Total nitrogen, TN)、速效磷(Available phosphorus, AP)和全磷(Total phosphorus, TP)参考《土壤农化分析》中的相关方法进行^[28]; 土壤 pH 值采用复合电极法测定^[29]; 碱解氮(Alkali-hydrolyzable nitrogen, AN)采用碱解扩散

法测定^[30]; 全钾(Total potassium, TK)含量采用碱熔-火焰光度法测定; 速效钾(Available potassium, AK)采用乙酸铵提取-火焰光度法测定^[31-32]。

1.4 物种多样性指数计算

选择以下多样性指数计算植物物种多样性^[33-34]。

物种丰富度指数(R)=植物物种总数

Simpson 多样性指数:

$$1 - D = 1 - \sum_{i=1}^s \frac{n_i(n_i - 1)}{N(N - 1)}$$

Shannon-Wiener 多样性指数:

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

Pielou 指数:

$$E = H / \ln S$$

式中: S 为群落中的物种数, N 为群落中总盖度, P_i 为第 i 个物种的相对重要值, n_i 为第 i 个物种的盖度。

1.5 数据分析

所有数据先在 Microsoft Excel 2013 中进行整理。利用 IBM SPSS Statistics (版本 25.0) 对不同干扰强度下的植物多样性指数及土壤化学性质进行单因素方差分析 (One-way ANOVA), 以检验各处理组间的显著性差异, 并采用 Tukey HSD 法进行事后多重比较。为消除各指标量纲差异对聚类分析的影响, 所有变量在 SPSS 中进行了 Z-score 标准化处理。聚类分析及热图绘制以标准化后的数据为基础, 通过 OriginPro (版本 2024 SR1, 10.1.0.178) 生成高质量图表, 以直观展示不同处理组间的差异及指标间的相似性。

2 结果与分析

2.1 养分添加与翻耕对高寒草甸植物生物量的影响

禾本科生物量从高到低排序为 NPK (464.46 g·m⁻²), DisNPK (366.07 g·m⁻²), CK (312.57 g·m⁻²), Dis (199.85 g·m⁻²)。其中, Dis 与 NPK 处理与对照组相比差异显著 ($P < 0.05$) (图 2A)。豆科生物量从高到低排序为 DisNPK (15.90 g·m⁻²), CK (11.28 g·m⁻²), NPK (9.16 g·m⁻²), Dis (3.45 g·m⁻²)。其中, Dis 与 DisNPK 处理与对照组相比差异显著 ($P < 0.05$) (图 2-B)。杂类草生物量从高到低排序为 DisNPK (148.30 g·m⁻²), Dis (65.80 g·m⁻²), NPK (22.37 g·m⁻²), CK (2.11 g·m⁻²), 不同处理间均具有显著性 ($P < 0.05$) (图 2C)。总生物量从高到低排序为 DisNPK (530.27 g·m⁻²), NPK (496.00 g·m⁻²), CK (325.97 g·m⁻²), Dis (269.10 g·m⁻²), 不同处理均与 CK 具有显著性 ($P < 0.05$) (图 2D)。

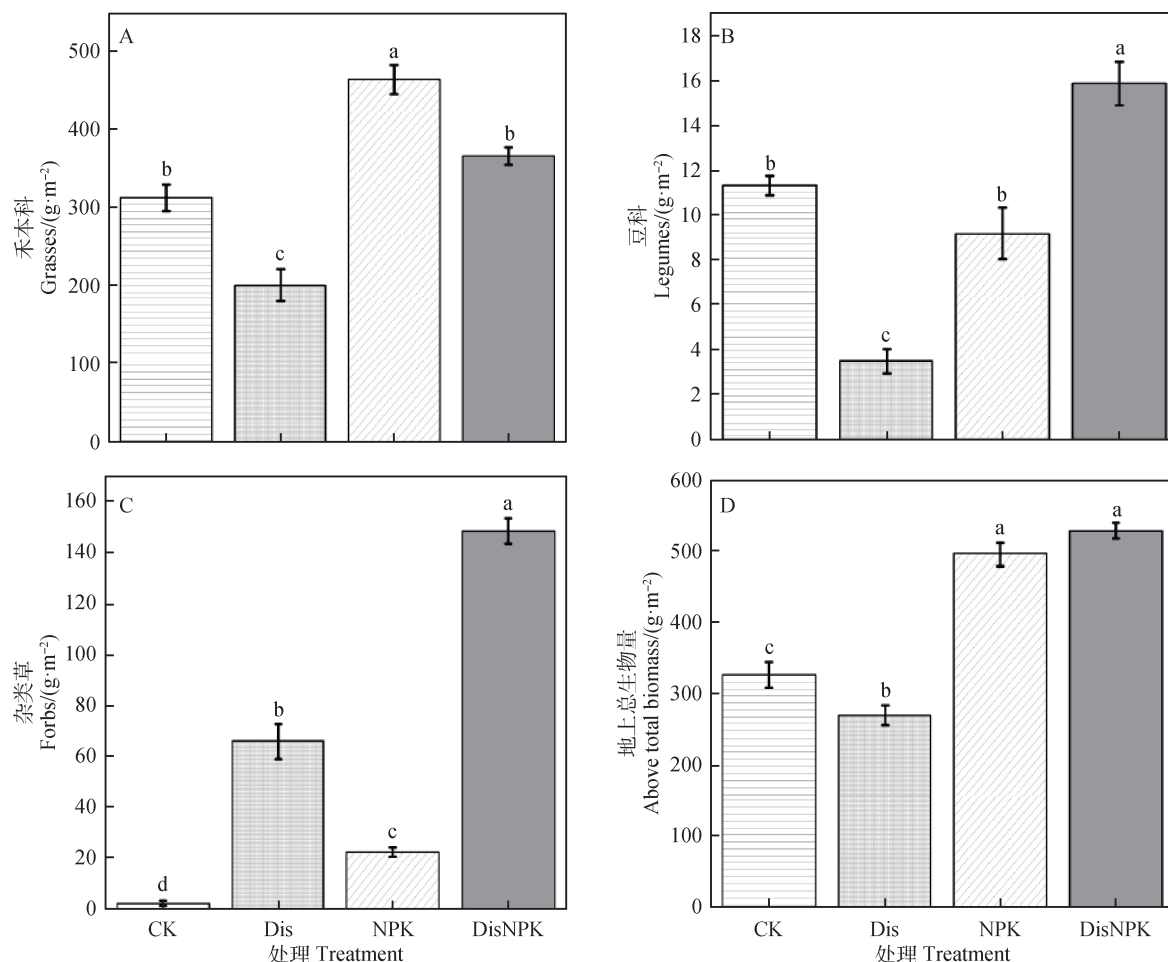


图2 植物生物量的变化

Fig. 2 Changes in plant biomass

注: A, 禾本科生物量; B, 豆科生物量; C, 杂类草生物量; D, 地上总生物量。柱形图中不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同
Note: A, Grasses biomass; B, Leguminosae biomass; C, Forbs biomass; D, Above-ground biomass. Different lowercase letters in the bar chart indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$). The same as below

2.2 养分添加与翻耕对土壤理化性质的影响

与对照组(CK)相比,各处理均显著提高了土壤 pH。其中,单一翻耕(Dis)、单一养分添加(NPK)及二者共同处理(DisNPK)的 pH 值依次为 7.34, 7.42 和 7.48, DisNPK 处理值最高,且与 CK 和 Dis 之间均存在显著差异($P < 0.05$)(图 3-A)。在土壤全量养分方面,各处理均显著提高了全氮、全钾和全磷含量。Dis 与 NPK 处理的全氮(分别为 $1.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.19 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、全钾(分别为 $9.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $9.33 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和全磷(分别为 $0.32 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.31 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)含量均显著高于 CK(全氮 $0.70 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全

钾 $8.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全磷 $0.27 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),但两者之间无显著差异;DisNPK 处理的全氮($1.41 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、全钾($9.86 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)和全磷($0.38 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)含量均最高,且显著高于其他所有处理($P < 0.05$)(图 3B, C, D)。在速效养分及有机碳方面,Dis 与 NPK 处理均显著提高了碱解氮、速效钾、速效磷和有机碳含量,且 NPK 处理的各指标增幅均大于 Dis 处理($P < 0.05$)。DisNPK 处理下的碱解氮($347.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、速效钾($465.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)、速效磷($48.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和有机碳($94.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)含量均最高,并显著高于其他处理($P < 0.05$)(图 3E, F, G, H)。

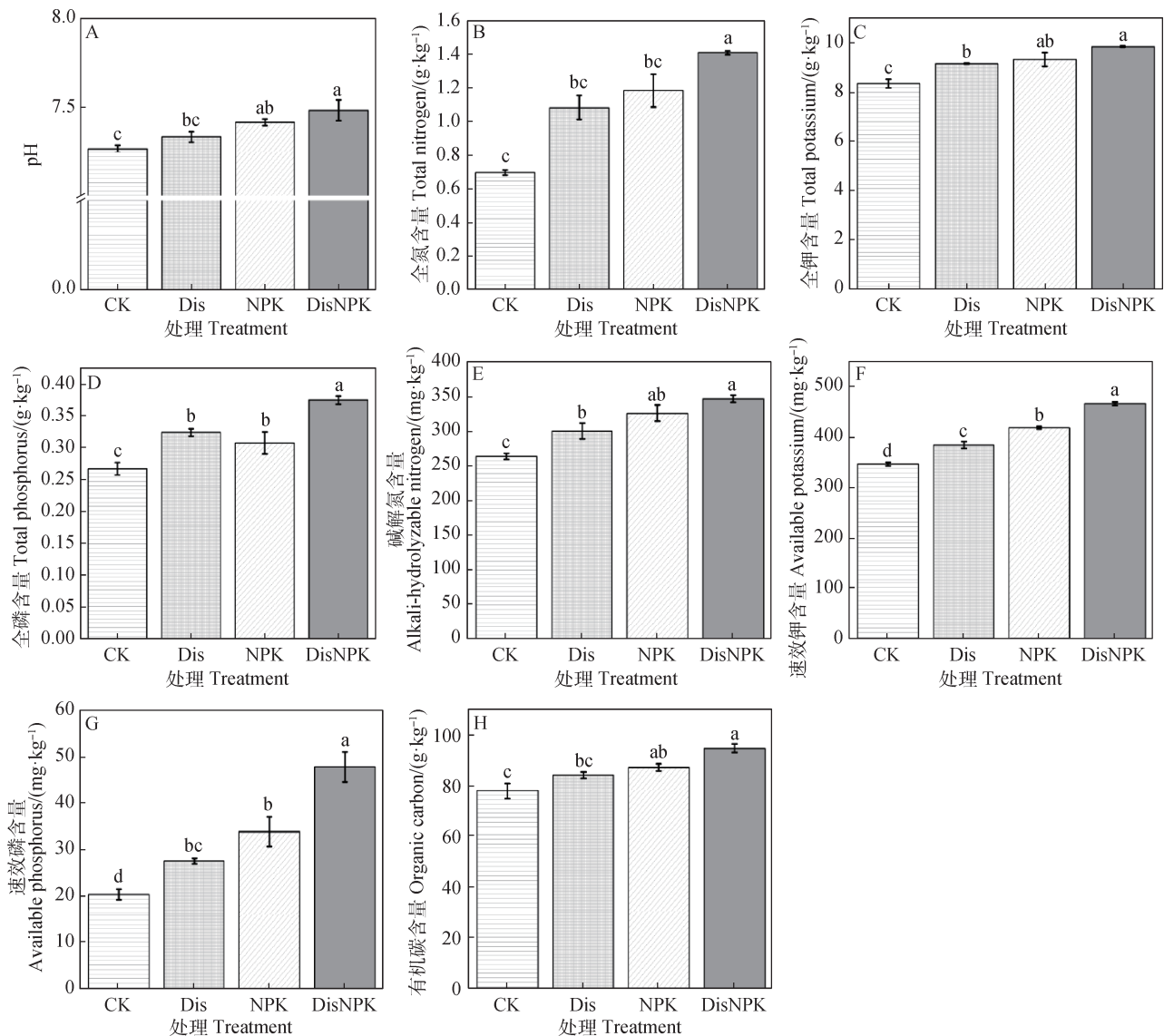


图3 土壤理化性质的变化

Fig. 3 Changes in soil physicochemical properties

注: A, pH 值; B, 全氮含量; C, 全钾含量; D, 全磷含量; E, 碱解氮含量; F, 速效钾含量; G, 速效磷含量; H, 有机碳含量

Note: A, pH; B, Total nitrogen content; C, Total potassium content; D, Total phosphorus content; E, Alkali-hydrolyzable nitrogen content; F, Available potassium content; G, Available phosphorus content; H, Organic carbon content

2.3 养分添加与翻耕对高寒草甸植物群落多样性的影响

2.3.1 养分添加与翻耕对植物群落组成与分布的影响 对植被调查数据的分析显示,物种在不同处理间分布差异显著(表1)。广布种赖草(*Leymus secalinus*)出现频率为100%(12/12样地),蒲公英(*Taraxacum mongolicum*)和鹤虱(*Carpesium abrotanoides*)分别出现于8个和9个样地。波伐早熟禾

(*Poa albertii*)、西北针茅(*Stipa sareptana*)和落草(*Koeleria macrantha*)集中分布于CK与NPK样地,出现样地数分别为6,6,5,且均未出现在Dis样地。相反,平卧轴藜(*Axyris prostrata*)在Dis及DisNPK样地中出现,宽苞棘豆(*Oxytropis latibracteata*)的4个出现样地也均属于此类处理,共有种占主导(16/17)。而独有种有白花枝子花(*Dracocephalum heterophyllum*),仅见于CK1。

表1 样地物种组成统计

Table 1 Statistics of species composition in sampling plots

物种名 Species name	学名 Scientific name	样地 Sampling plot	出现样地数 Number of sampling plots present	分布 Distribution
冷蒿	<i>Artemisia frigida</i>	CK1,CK3,NPK2	3	共有
垂穗披碱草	<i>Elymus nutans</i>	CK1,CK2,CK3,NPK1,NPK2,NPK3,DisNPK3	7	共有
多裂委陵菜	<i>Potentilla multifida</i>	Dis3,NPK1	2	共有
宽苞棘豆	<i>Oxytropis latibracteata</i>	Dis2,NPK2,DisNPK2,DisNPK3	4	共有
密花香薷	<i>Elsholtzia densa</i>	Dis2,DisNPK1	2	共有
平卧轴藜	<i>Axyris prostrata</i>	Dis1,Dis2,Dis3,NPK1,DisNPK1,DisNPK2,DisNPK3	7	共有
波伐早熟禾	<i>Poa albertii</i>	CK1,CK2,CK3,NPK1,NPK2,NPK3	6	共有
独行菜	<i>Lepidium apetalum</i>	CK2,DisNPK3	2	共有
白花枝子花	<i>Dracocephalum heterophyllum</i>	CK1	1	独有
芥	<i>Capsella bursa-pastoris</i>	CK1,NPK2,NPK3	3	共有
蒲公英	<i>Taraxacum mongolicum</i>	CK2,CK3,Dis1,Dis2,NPK1,NPK2,DisNPK2,DisNPK3	8	共有
西北针茅	<i>Stipa sareptana</i>	CK1,CK2,CK3,NPK1,NPK2,NPK3	6	共有
赖草	<i>Leymus secalinus</i>	CK1,CK2,CK3,Dis1,Dis2,Dis3,NPK1,NPK2,NPK3,DisNPK1,DisNPK2,DisNPK3	12	共有
青海苜蓿	<i>Medicago archiducis-nicolai</i>	CK1,CK3,Dis1,Dis3,NPK1,NPK2,DisNPK3	7	共有
鸡冠茶	<i>Sibbaldianthe bifurca</i>	CK2,Dis1,NPK2,DisNPK1,DisNPK3	5	共有
鹤虱	<i>Carpesium abrotanoides</i>	CK1,Dis1,Dis2,Dis3,NPK1,NPK3,DisNPK1,DisNPK2,DisNPK3	9	共有
落草	<i>Koeleria macrantha</i>	CK2,CK3,NPK1,NPK2,NPK3	5	共有

2.3.2 养分添加与翻耕对高寒草甸植物群落 α 多样性的影响 植物丰富度从高到低依次为NPK(9.33),CK(8.33),DisNPK(6.33),Dis(5.67)。其中,NPK处理显著高于Dis处理(5.67)($P<0.05$)。Shannon-Wiener指数从高到低依次为NPK(1.75),CK(1.64),DisNPK(1.28),Dis(1.17),且NPK与CK处理显著高于Dis与DisNPK处理($P<0.05$) (图4B)。Simpson指数从高到低依次为NPK(0.78),CK(0.77),DisNPK(0.65),Dis(0.62),NPK与CK处理显著高于Dis与DisNPK处理($P<0.05$) (图4-C)。Pielou均匀度指数在各处理间差异不显著,数值介于0.68~0.79之间(图4D)。

2.3.3 养分添加与翻耕对高寒草甸植物群落主成分分析 主成分分析结果显示,全钾(TK)、全磷(TP)、全氮(TN)、有机质(SOM)、速效钾(AK)、速效磷(AP)、碱解氮(AN)、有机碳(SOC)等土壤养分指标的载荷箭头均指向PC1正向区域,且箭头长度较长,表明这些因子与PC1呈强正相关,是驱动PC1变异的关键因子。进一步分析植物群落与土壤

理化性质的共同影响时,禾草(GR)、豆科(LEG)、生物量(AGB)、杂类草(FORB)等指标也呈现出与PC1的强正相关关系。结合处理组分布来看,Dis、DisNPK、NPK组的土壤养分含量及植被生长状况均显著高于CK组,这些差异共同构成了不同处理组在PC1轴上发生分离的核心原因(图5)。

2.4 养分添加与翻耕对高寒草甸植物群落相关性热图及关联网络可视化

2.4.1 土壤理化性质与物种多样性指数的相关性 物种丰富度(R)、Shannon-Wiener指数、Simpson指数和Pielou均匀度指数均与碱解氮(AN)、有效磷(AP)、土壤有机碳(SOC)、土壤有机质(SOM)呈极强的正相关(r 接近0.90,且 $P<0.01$),与全磷(TP)呈显著负相关($P<0.05$);而pH、全钾(TK)、速效钾(AK)与这些物种多样性指数的相关性较弱,说明AN、AP、SOC、SOM是提升物种丰富度和多样性的关键土壤因子,TP对其有显著抑制作用,pH、TK、AK的影响则不显著(图6)。

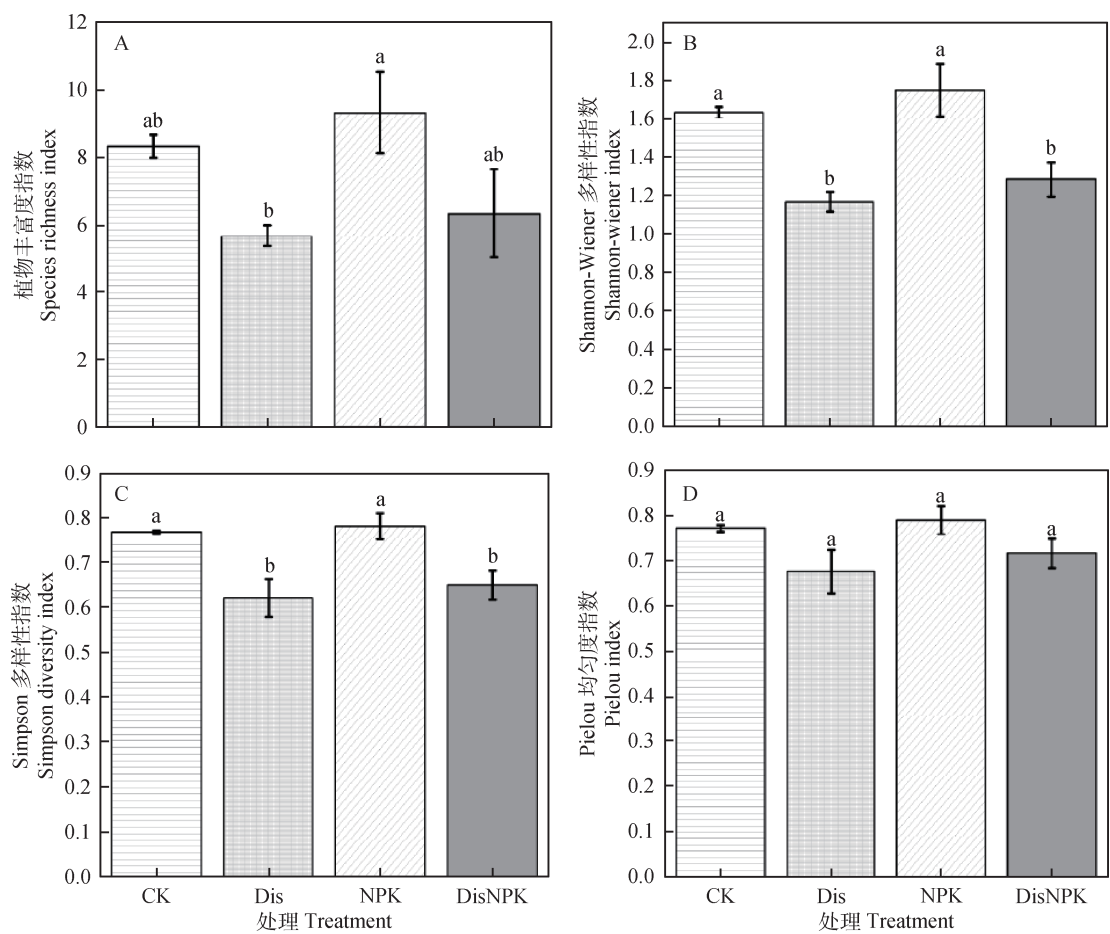


图 4 植物群落多样性的变化

Fig. 4 Changes in plant community diversity

注: A, 植物丰富度指数; B, Shannon-Wiener 指数; C, Simpson 指数; D, Pielou 均匀度指数

Note: A, Species richness index; B, Shannon-wiener index; C, Simpson diversity index; D, Pielou index

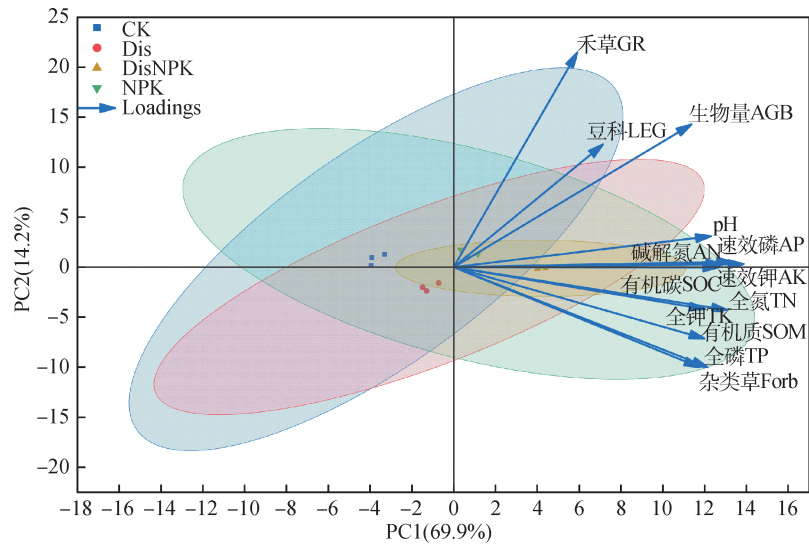


图 5 综合主成分分析

Fig. 5 Comprehensive principal component analysis

2.4.2 不同土壤处理下土壤-地上生物量相关性 禾草生物量(GR)与全钾(TK)、全磷(TP)呈显著负相关(蓝色虚线, $P < 0.05$),与其他土壤指标相

关性较弱。豆科生物量(LEG)与碱解氮(AN)、速效钾(AK)、有效磷(AP)、土壤有机碳(SOC)、土壤有机质(SOM)呈正相关(红色实线),其中与 AN、AK、

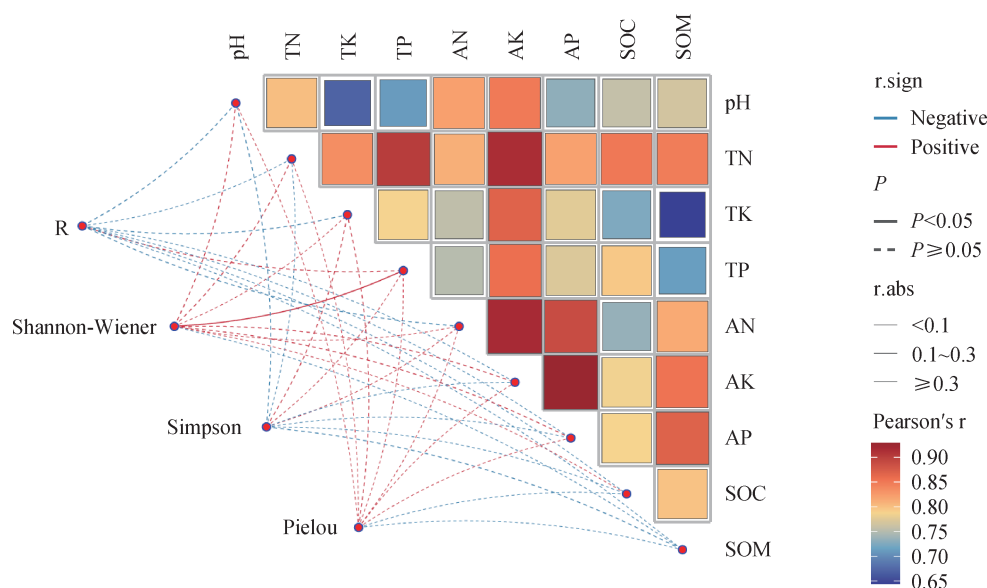


图 6 土壤理化性质与物种多样性指数的相关性

Fig. 6 Correlation between soil physicochemical properties and species diversity indices

注: TK, 全钾; TP, 全磷; TN, 全氮; SOM, 有机质; AK, 速效钾; AP, 速效磷; AN, 碱解氮; SOC, 有机碳; R, 植物丰富度指数

Note: TK, Total potassium; TP, Total phosphorus; TN, Total nitrogen; SOM, Organic matter; AK, Available potassium; AP, Available phosphorus; AN, Alkali-hydrolyzable nitrogen; SOC, Organic carbon; R, Species richness index

AP 的相关性较强($r \geq 0.3, P < 0.05$)。杂类草生物量(FORB)与 AN, AK, AP, SOC, SOM 呈强正相关(红色实线, r 接近 0.90, $P < 0.01$), 与 TN(全氮)也呈正相关。总生物量(AGB)与 AN, AK, AP, SOC, SOM 呈强正相关(红色实线, r 接近 0.90, $P < 0.01$),

说明这些土壤养分对生物量积累至关重要。碱解氮(AN)、速效钾(AK)、有效磷(AP)、土壤有机碳(SOC)和土壤有机质(SOM)是促进豆科、杂类草生长及生物量积累的关键土壤因子;全钾(TK)、全磷(TP)则对禾草生长有显著抑制作用(图 7)。

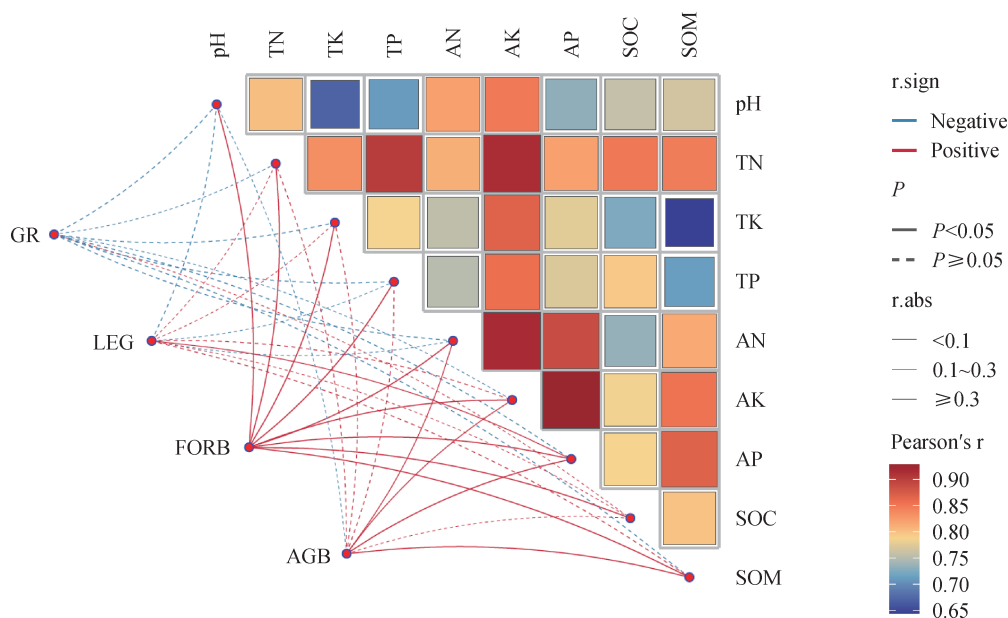


图 7 不同土壤处理下土壤-地上生物量相关性

Fig. 7 Correlation between soil and aboveground biomass under different soil treatments

注: GR, 禾草; LEG, 豆科; FORB, 杂类草; AGB, 地上生物量

Note: GR, Grasses; LEG, Leguminosae; FORB, Forbs; AGB, Above-ground biomass

2.4.3 土壤-植物系统各指标对不同处理响应的综合热图分析 热图分析直观展示了不同处理下高寒草甸土壤理化性质与植物生物量及多样性指标间的总体相关性网络(图8)。整体上,土壤养分指标与植物生产力之间呈现出紧密的协同关联。其中,土壤有机质(SOM)、全氮(TN)和速效磷(AP)不仅彼此间高度正相关($r>0.8, P<0.05$),还与地上总生物量(AGB)及禾本科生物量(GR)

呈现出强烈正相关关系。在植物群落特征方面,物种丰富度(R)、Shannon-Wiener指数和 Simpson指数与禾本科生物量(GR)、豆科(LEG)和总生物量(AGB)呈正相关关系,且与禾本科生物量的相关性最强。Shannon-Wiener指数和 Simpson指数均土壤全氮与土壤全氮(TN)、碱解氮(AN)、速效磷(AP)、有机碳(SOC)、有机质(SOM)呈现清晰的正相关。

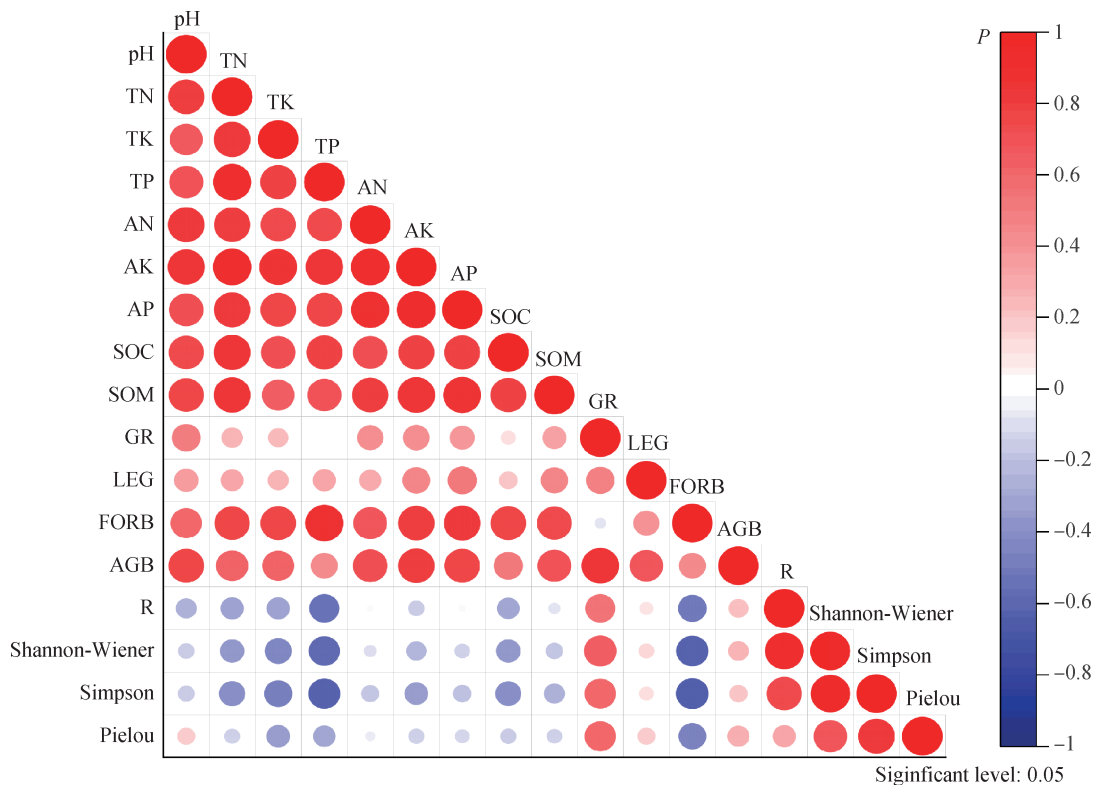


图8 不同处理对高寒草甸土壤-植物系统影响

Fig. 8 Effects of different treatments on the soil-plant system in an alpine meadow

3 讨论

3.1 翻耕与养分添加对土壤理化性质的影响

翻耕显著改变了高寒草甸土壤结构,可能通过打破致密层、增加土壤孔隙度和通气性,改善了土壤的水分与空气交换条件^[35-37],为后续养分转化过程提供了有利微环境。翻耕也可能加速了有机质的分解过程,促进养分的释放,尤其是加强氮、磷、钾等关键养分的矿化作用^[38-39]。Dis处理下提高了土壤全氮含量(全氮 $1.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,对照组 $0.70 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),同时速效钾含量增加至 $385.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,表明适度翻耕在一定程度上提升了土壤养分水平。结合已有研究^[35],推测其作用机制不仅限于物理结构改变,还可能通过影响微生物群落组成和活性,促进

有机质分解和养分矿化,从而提高土壤肥力。翻耕在高寒草甸中不仅能提高土壤的有效养分含量,还能激活土壤中长期被固定的养分。有研究指出,翻耕通过增强土壤有机物矿化有效促进养分循环^[39],翻耕补播等措施还能长期改变土壤微结构和微生物群落,从而为养分循环提供持续动力^[14],这与本研究中Dis处理提高土壤养分水平的结果相吻合。

适量添加氮、磷、钾等养分对于改善高寒草甸土壤理化性质具有较大影响^[40-42]。氮能促进土壤的硝化和铵化作用,增加土壤氮的有效性,有利于植物生长并提高土壤肥力^[43]。施磷可以明显地改善高寒草甸中缺磷的现象,增加土壤中磷的有效性,促进植物的生长和提高群落生产力^[44]。经过氮磷钾混合处理(NPK)后,土壤中速效磷含量达到

34.10 mg·kg⁻¹, 碱解氮含量为 326.64 mg·kg⁻¹, 表明外源养分输入有助于提升土壤肥力并支持植物生长^[45-46]; 同时, 过量施氮会造成土壤中氮库结构被改变、大量氮素以硝化形式损失、可能造成土壤微生物群落组成变化, 破坏土壤生物多样性, 使得出现潜在生态失衡的可能^[26, 41]。

翻耕与养分添加的联合使用(DisNPK)在土壤理化性质的改善上展现出了明显的协同效应。通过翻耕改善土壤的物理通透性, 后者直接提升养分水平与化学性质^[47]。在 DisNPK 处理下, 土壤中全钾含量显著升高, 达到 9.86 g·kg⁻¹, 有机质含量为 158.11 g·kg⁻¹, 这显示了翻耕不仅增加了土壤的养分含量供给能力, 还可能通过促进土壤中有机物的分解和微生物活动加速了土壤肥力的提升^[48]。此外, 翻耕和养分添加处理下土壤 pH 值变化幅度相对较小, 协同效应可能在一定程度上减缓了单一施肥引起的过度酸化。

3.2 翻耕与养分添加对高寒草甸植物多样性的影响

翻耕处理对高寒草甸植物群落多样性产生了显著抑制作用, Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数分别下降至 1.17 和 0.62, 明显低于其他处理 ($P < 0.05$)。这一结果反映了强烈物理干扰对植物群落的双重影响机制: 强烈的物理干扰可能通过破坏植物根系, 导致对机械干扰敏感的物种(如波伐早熟禾、西北针茅等)大量死亡, 甚至在群落中完全消失^[49]; 另一方面, 其还可能改变了土壤微环境的结构, 影响了物种间的共存关系, 这资源利用模式决定竞争结局的理论相符^[50-51]。事实上, 即使停止干扰, 土壤结构的改变仍会持续影响植物群落的恢复方向, 这即是物理干扰的遗留效应^[52]。

养分添加处理可能通过改变植物间对光照、养分的竞争关系, 从而显著影响整个植物群落。在氮磷钾混合施肥的条件下, Shannon-Wiener 指数达到 1.75, 相较于 Dis 和 DisNPK 处理有所提高, 但群落优势种更加集中, 功能群组成趋于单一。这一现象从生态系统角度验证了“去稳定化”理论^[18], 其具体机制符合“光竞争模型”: 土壤富营养化使优势物种优先利用资源, 其生物量和高度的增加导致冠层郁闭, 加剧光竞争, 从而抑制矮小物种的生长^[22, 49, 52-53]。本研究中, 在 NPK 处理下禾草生物量提高(464.46 g·m⁻²)而杂类草增加幅度较小, 表明养分富集降低

了不同物种对环境波动的响应差异性(即物种异步性), 使群落结构出现同质化的趋势, 这和 Carroll 等人^[18]的结论是一致的, 即向系统中添加氮、磷等关键营养物质有利于增强优势种的竞争力, 通过加强优势种的竞争排他作用来降低群落抵抗外界干扰的能力, 对群落的稳定性具有明显的“去稳定化”效应。正如 Zhang 等^[50]研究所指出, 在富营养化环境中, 早期生长速率的微小差异足以在短期内决定植物群落的组成格局。这种基于生长优势的非对称竞争不仅影响植物群落结构, 还可能通过简化物种间互作网络, 进而削弱整个生态系统的稳定性^[26, 52]。

翻耕与养分添加的交互处理(DisNPK)在一定程度上提高了高寒草甸植物群落的多样性, 但仍显著低于自然水平。这一结果可能源于两种机制的共同作用: 一方面, 翻耕激活了土壤中休眠的种子库, 为植物种子的萌发与再生创造有利条件; 另一方面, 土壤富营养化(即人为活动导致土壤氮(N)、磷(P)和钾(K)的可用性增加)及翻耕的促进下, 杂类草可以在松动、透气的土壤环境中迅速建立种群(杂类草生物量高达 148.30 g·m⁻²), 从而改变群落的物种组成, 并在一定程度上提升了局部物种丰富度。然而, 热图分析说明翻耕完全掩盖了养分添加处理在群落多样性、丰富度和均匀度方面的积极作用。据此推测, 翻耕过程中关键因素可能有两个: 一方面翻耕深度为 20 cm, 可能导致多年生植物(特别是禾草类)根系网络受损, 破坏了其再生基础, 这种机械损毁造成的破坏不能通过外源养分的投入得到及时弥补^[54-55]; 另一方面翻耕会显著改变土壤环境, 例如增加土壤孔隙度, 这虽利于土壤通气, 但是也会加速速效养分的淋溶^[56], 因而在缺乏合理管控的前提下, 施加的外源养分难以得到充分利用, 会减弱上述积极影响。同时即使有养分输入, 植物群落的恢复仍然受物理干扰的限制^[54, 57]。本研究的种子恢复模式与 Zong 等^[52]在退化高寒草甸中的观察一致: 外来养分能提高群落生产力, 却难以真正恢复群落结构。外源养分难以弥补翻耕造成的群落破坏, 表明物理干扰的遗留效应可能比养分限制对群落结构的影响力更持久。综合来看, 本研究的结果为“去稳定化”理论提供了实证支持: 外源养分输入确实通过简化群落结构、降低物种异步性, 使得高寒草甸生态系统在面对干扰时更具脆弱性。

3.3 翻耕与养分添加对地上生物量的影响

结果表明养分添加对高寒草甸植物生物量具有显著的提升效果,但同时会导致群落结构简化和多样性下降。本研究中,NPK处理下土壤碱解氮、速效磷和速效钾含量分别上升至 $326.64\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $34.10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $419.30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,促进植物总生物量达到 $495.99\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,但各多样性指数与对照组相比,无明显上升。这一现象符合“生产力-多样性权衡”理论,即外源养分输入在提升初级生产力的同时,可能会通过强化种间竞争抑制生物多样性。其内在机制可能在于,养分添加能改变微生物化学计量平衡,加速有机质矿化,从而进一步释放速效养分,为优势种创造有利条件^[46]。

功能群水平的响应进一步证明养分添加促进了竞争。禾本科植物是对养分输入高度敏感的功能群,在NPK处理下生物量达 $464.46\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,远高于对照组($312.57\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$),说明外源性养分能够强烈诱导其生长。这一结果符合Zhang等^[50]提出的“早期生长优势”理论:在养分富集条件下,植物表现出更强的生长趋势,尤其是具有较高资源获取效率的优势种(如禾本科植物)。部分生长快的优势种可获得更多的光照、水分和养分等资源来抑制其他物种的生长,从而使群落多样性减少^[52]。不过在翻耕过程中,禾本科生物量下降至 $199.85\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,说明翻耕可能不利于根系发育或影响了土壤结构,从而削弱了禾本科的竞争能力。但是豆科植物在DisNPK处理中生物量提升至 $15.90\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$,表明其在高养分、受扰动的环境中具有一定耐受性和适应潜力^[46]。Zong等^[52]在退化高寒草甸的研究中也发现,豆科植物虽然在养分添加后生物量增幅不大,但由于共生固氮能够缓解其受到的氮限制,因此该类植物仍能在竞争中稳定^[52]。

杂类草则在DisNPK处理中占据优势(生物量为 $148.30\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$),显示出较强的环境适应性。翻耕可能通过激活种子库、改善土壤疏松度,为杂类草萌芽与建群创造条件;而养分添加则进一步促进其扩张。Jarne等^[58]指出,翻耕与施肥会显著改变土壤养分有效性,进而更明显的观察到能快速响应养分变化的功能群。这一机制可解释本研究中杂类草在复合处理中的优势现象。然而,尽管杂类草的扩张在一定程度上带动了群落生物量的恢复,但其群落多样性仍低于自然状态,说明单纯生物量提升并不能等效于生态系统的恢复。

综合来看,养分添加可能主要通过强化资源竞争促使植物生物量在功能群间重新分配,而翻耕可能通过改变微生境条件调控不同功能群的响应强度。故未来高寒草甸生态管理需重视“养分-扰动”复合干预下多样性维持与生产力提升之间的权衡,避免单一追求生物量而导致生态功能退化。

4 结论

翻耕和养分添加作为高寒草甸常见的管理措施,会影响草甸的生产力和物种多样性。本研究表明,翻耕通过改变土壤理化性质,养分添加通过外源补给的方式改变土壤肥力特征,进而对群落多样性与生产力产生影响。无论是翻耕还是养分添加,在独立处理下,其都直接导致了植物群落简化;二者交互处理表明翻耕造成的影响更强。因此在高寒草甸生态保护中尽量减少物理扰动。

参考文献

- [1] WANG Y Y, MA Y M, LI H X, et al. Carbon and water fluxes and their coupling in an Alpine meadow ecosystem on the north-eastern Tibetan Plateau[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2020, 142(1): 1-18
- [2] DUAN Y Y, YANG H, LI J, et al. Effects of plateau pika disturbance on soil net nitrogen mineralization from small to large scales in Alpine meadows[J]. *Catena*, 2025, 259: 109384
- [3] WEI L M, ZHAO W Z, FENG X Y, et al. Freeze-thaw desertification of Alpine meadow in Qilian Mountains and the implications for Alpine ecosystem management[J]. *Catena*, 2023, 232: 107471
- [4] FAN J, LIANG B, LIU H C, et al. Impact on local sustainability of the northward expansion of human activities into protected areas in northern Tibet[J]. *Land Degradation & Development*, 2022, 33(15): 2945-2959
- [5] 张勇. 旅游踩踏对香格里拉高寒草甸植物群落的短期影响[D]. 昆明: 云南大学, 2013: 1-2
ZHANG Y. Short-term impacts of tourism trampling on Shangri-la Alpine meadow vegetation[D]. Kunming: Yunnan University, 2013: 1-2
- [6] 于格, 鲁春霞, 谢高地. 青藏高原北缘地区高寒草甸土壤保持功能及其价值的实验研究[J]. *北京林业大学学报*, 2006, 28(4): 57-61
YU G, LU C X, XIE G D. Soil conservation capacity of Alpine meadow ecosystem and its economic value in the northern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(4): 57-61
- [7] 包志鹏, 林栋, 刘雪鹏, 等. 放牧强度对高寒草甸土壤有机碳及其组分的影响[J]. *草地学报*, 2026, 34(1): 172-181
BAO Z P, LIN D, LIU X P, et al. Effects of grazing intensities on soil organic carbon and its fractions in Alpine meadows[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2026, 34(1): 172-181
- [8] XU Z, LI X, ZHANG L. A bibliometric analysis of research

- trends and hotspots in Alpine grassland degradation on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *PeerJ*, 2023, 11: e16210
- [9] 石明明, 王喆, 周秉荣, 等. 青藏高原草地退化特征及其与气候因子的关系[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(12): 3271-3278
SHI M M, WANG Z, ZHOU B R, et al. Characteristics of grassland degradation and its relationship with climate factors on Qinghai-Tibetan Plateau, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(12): 3271-3278
- [10] 阿里地区林业和草原局. 第二轮中央生态环境保护督察反馈意见(27-02)整改措施完成情况公示表[EB/OL]. <https://lycy.al.gov.cn/info/2363/36542.htm>, 2025-11-04/2026-02-26
- [11] XIONG Q L, XIAO Y, LIANG P H, et al. Trends in climate change and human interventions indicate grassland productivity on the Qinghai-Tibetan Plateau from 1980 to 2015[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 129: 108010
- [12] CHEN X Y, WANG X L, SONG Y H, et al. A review of studies on the effects of anthropogenic disturbances on plant-soil-microorganism interactions in grassland ecosystems: based on grazing and tourism perspectives[J]. *Agronomy*, 2024, 14(12): 2890
- [13] 杨世琦, 韩钰, 武清涵, 等. 农田覆盖技术的演进、发展与展望[J]. *中国农业大学学报*, 2025, 30(9): 15-26
YANG S Q, HAN Y, WU Q H, et al. Field mulching techniques: evolution, advances, and future perspectives [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(9): 15-26
- [14] 张宝贵, 赵宇婷, 刘晓娇, 等. 翻耕补播对青藏高原疏勒河上游高寒草甸土壤可培养微生物数量的影响[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(3): 1027-1035
ZHANG B G, ZHAO Y T, LIU X J, et al. Research on response characteristics of Alpine meadow microbial population to tillage in the upstream regions of Shule River, Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(3): 1027-1035
- [15] MWAFULIRWA L, SIZMUR T, DAYMOND A, et al. Cocoa pod husk-derived organic soil amendments differentially affect soil fertility, nutrient leaching, and greenhouse gas emissions in cocoa soils [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 479: 144065
- [16] HAUTIER Y, NIKLAUS P A, HECTOR A. Competition for light causes plant biodiversity loss after eutrophication[J]. *Science*, 2009, 324(5927): 636-638
- [17] HAUTIER Y, SEABLOOM E W, BORER E T, et al. Eutrophication weakens stabilizing effects of diversity in natural grasslands[J]. *Nature*, 2014, 508(7497): 521-525
- [18] CARROLL O, BATZER E, BHARATH S, et al. Nutrient identity modifies the destabilising effects of eutrophication in grasslands[J]. *Ecology Letters*, 2022, 25(4): 754-765
- [19] KÖRSCHENS M, ALBERT E, ARMBRUSTER M, et al. Effect of mineral and organic fertilization on crop yield, nitrogen uptake, carbon and nitrogen balances, as well as soil organic carbon content and dynamics: results from 20 European long-term field experiments of the twenty-first century[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2013, 59(8): 1017-1040
- [20] ZHOU C F, DUN X J, TANG Q, et al. Elevation-dependent shifts in soil phosphorus forms and phosphorus-solubilizing microbial diversity suggest enhanced bioavailable phosphorus cycling with rising temperatures[J]. *Microbiology Spectrum*, 2025, 13(8): e01300-e01324
- [21] GAO Y X, SONG X, ZHENG W K, et al. The controlled-release nitrogen fertilizer driving the symbiosis of microbial communities to improve wheat productivity and soil fertility [J]. *Field Crops Research*, 2022, 289: 108712
- [22] KOTAS P, CHOMA M, ŠANTRŮČKOVÁ H, et al. Linking above- and belowground responses to 16 years of fertilization, mowing, and removal of the dominant species in a temperate grassland[J]. *Ecosystems*, 2017, 20(2): 354-367
- [23] ZHAO Y, ZHANG M L, LIU Z Q, et al. Migration and transformation of soil phosphorus by organic acids: a global meta-analysis [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2024, 24(2): 589-602
- [24] 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: 11-46
LIU Y. Effects of multi-gradient nitrogen and phosphorus addition on community structure and productivity of Alpine meadow [D]. Xining: Qinghai University, 2023: 11-46
- [25] THEODOSE T A, BOWMAN W D. Nutrient availability, plant abundance, and species diversity in two Alpine tundra communities[J]. *Ecology*, 1997, 78(6): 1861-1872
- [26] PEÑUELAS J, POULTER B, SARDANS J, et al. Human-induced nitrogen-phosphorus imbalances alter natural and managed ecosystems across the globe[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2934
- [27] JI G X, HU G Z, GAO Q Z, et al. N limitation may inhibit the effectiveness of close-to-nature restoration measures for degraded Alpine meadows on the northern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Basic and Applied Ecology*, 2024, 77: 35-44
- [28] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-30, 58-63, 113-117, 226-231
- [29] AITKEN R L, MOODY P W. The effect of valence and ionic-strength on the measurement of pH buffer capacity[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 1994, 32(5): 975-984
- [30] 杨代军, 黄莺, 虎振东. 水合热法测定土壤有机质含量的氧化条件优选[J]. *广西农业科学*, 2009(10): 1335-1338
YANG D J, HUANG Y, HU Z D. Preferable oxidation conditions for determination of soil organic matter by hot hydration method[J]. *Guangxi Agricultural Sciences*, 2009(10): 1335-1338
- [31] 李诗琴, 刘俊俊, 谷云龙, 等. 钼锑抗比色法测定枳壳中全磷含量的不确定度评估[J]. *现代食品*, 2022(23): 123-126
LI S Q, LIU J J, GU Y L, et al. Evaluation of uncertainty in the determination of total phosphorus content in fructus aurantii by molybdenum antimony anticolorimetric method [J]. *Modern Food*, 2022(23): 123-126
- [32] 曹凯红, 章金龙, 李树德. 两种测定土壤全磷含量方法对比[J]. *保山学院学报*, 2018, 37(5): 26-29
CAO K H, ZHANG J L, LI S D. Comparison of two methods for determination of total phosphorus in soil [J]. *Journal of Baoshan Teachers College*, 2018, 37(5): 26-29
- [33] 田森, 安航, 刘智军, 等. 三江源区草地物种多样性和生产力对环境因子的响应特征[J]. *草地学报*, 2025, 33(12): 3983-3993

- TIAN M, AN H, LIU Z J, et al. The response characteristics of grassland species diversity and productivity to environmental factors in the three-river-source area[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(12):3983-3993
- [34] 马婧娟, 李希来, 尹通江, 等. 高寒草甸退化斑块植物群落演替特征及土壤限制因子研究[J/OL]. . <https://link.cnki.net/urlid/11.3362.S.20260104.1549.002>, 2026-01-04/2026-02-26
- MA J J, LI X L, YIN T J, et al. Study on succession characteristics of plant communities and soil limiting factors in degraded patches of alpine meadow[J/OL]. <https://link.cnki.net/urlid/11.3362.S.20260104.1549.002>, 2026-01-04/2026-02-26
- [35] WU M Q, PHALEMPIN M, REITZ T, et al. Links between soil microstructure dynamics and carbon cycling in response to land use and climate change[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2025, 211:109982
- [36] DUAN Y F, XIE B H, LV W G, et al. Earthworm - biochar linkage drives saline-alkali soil health restoration: processes, mechanisms and prospects[J]. *Desalination*, 2026, 620:119603
- [37] CHICHONGUE O, VAN TOL J, CERONIO G, et al. Effects of tillage systems and cropping patterns on soil physical properties in Mozambique[J]. *Agriculture*, 2020, 10(10):448
- [38] ZHOU J, SUN T T, SHI L L, et al. Organic carbon accumulation and microbial activities in arable soils after abandonment: A chronosequence study[J]. *Geoderma*, 2023, 435:116496
- [39] RAIESI F, SALEK-GILANI S. The potential activity of soil extracellular enzymes as an indicator for ecological restoration of rangeland soils after agricultural abandonment[J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 126:140-147
- [40] YAN G Y, LUO X, HUANG B B, et al. Imbalance in nitrogen and phosphorus allocation between tree roots and leaves induced by nitrogen addition[J]. *Science of the Total Environment*, 2025, 958:177925
- [41] WANG S Q, SONG M H, WANG C M, et al. Mechanisms underlying soil microbial regulation of available phosphorus in a temperate forest exposed to long-term nitrogen addition[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 904:166403
- [42] LUO M, MOORHEAD D L, OCHOA-HUESO R, et al. Nitrogen loading enhances phosphorus limitation in terrestrial ecosystems with implications for soil carbon cycling[J]. *Functional Ecology*, 2022, 36(11):2845-2858
- [43] ZHANG J Q, LIU Y H, DONG J Y. Responses of Alpine soil nitrification and denitrification rates to nitrogen addition gradient—the role of functional genes[J]. *Agriculture*, 2023, 13(2):245
- [44] LI J H, YANG Y J, LI B W, et al. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on soil carbon fractions in Alpine meadows on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Plos One*, 2014, 9(7):e103266
- [45] SPOHN M, SCHLEUSS P M. Addition of inorganic phosphorus to soil leads to desorption of organic compounds and thus to increased soil respiration[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 130:220-226
- [46] QIN W K, FENG J G, ZHANG Q F, et al. Nitrogen and phosphorus addition mediate soil priming effects *via* affecting microbial stoichiometric balance in an Alpine meadow[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 908:168350
- [47] SUN B, ROBERTS D M, DENNIS P G, et al. Microbial properties and nitrogen contents of arable soils under different tillage regimes[J]. *Soil Use and Management*, 2014, 30(1):152-159
- [48] TAO J J, FAN L C, JIANG T, et al. *In situ* visualization of soil profile acidification and processes following nitrogen fertilization and liming[J]. *Geoderma*, 2025, 456:117243
- [49] BORER E T, SEABLOOM E W, GRUNER D S, et al. Herbivores and nutrients control grassland plant diversity *via* light limitation[J]. *Nature*, 2014, 508(7497):517-520
- [50] ZHANG P F, HEFTING M M, SOONS M B, et al. Fast and furious: early differences in growth rate drive short-term plant dominance and exclusion under eutrophication[J]. *Ecology and Evolution*, 2020, 10(18):10116-10129
- [51] DYBZINSKI R, TILMAN D. Resource use patterns predict long-term outcomes of plant competition for nutrients and light[J]. *The American Naturalist*, 2007, 170(3):305-318
- [52] ZONG N, SHI P L. Enhanced community production rather than structure improvement under nitrogen and phosphorus addition in severely degraded Alpine meadows[J]. *Sustainability*, 2019, 11(7):2023
- [53] DOLEŽAL J, LANTA V, MUDRÁK O, et al. Seasonality promotes grassland diversity: interactions with mowing, fertilization and removal of dominant species[J]. *Journal of Ecology*, 2019, 107(1):203-215
- [54] 高天明, 张瑞强, 刘铁军, 等. 阴山北麓浅耕翻季节对草地植被和土壤的影响[J]. *草业科学*, 2012, 29(5):676-680
- GAO T M, ZHANG R Q, LIU T J, et al. Effect of Shallow tillage during different season on grassland vegetation and soil in the Xilamuren region of North Yin Mountains[J]. *Pratacultural Science*, 2012, 29(5):676-680
- [55] 赵伟浩, 嵇晨仪, 肖庆礼, 等. 翻耕深度对烤烟根系发育和生物量积累及质量的影响[J]. *土壤通报*, 2025, 56(5):1288-1296
- ZHAO W H, JU C Y, XIAO Q L, et al. Effect of tillage depths on root growth, biomass accumulation and quality of tobacco plants[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2025, 56(5):1288-1296
- [56] 王辉, 王全九, 邵明安, 等. 翻耕与压实对坡地土壤溶质迁移过程的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2008, 6(6):21-25, 86
- WANG H, WANG Q J, SHAO M A, et al. Influence of tillage and compaction on solute transport process on the sloping land[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(6):21-25, 86
- [57] 高志成, 田佳妮, 霍艳双, 等. 切根和浅耕翻措施对退化草地生长季土壤性质及植物群落的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(11):3824-3829
- GAO Z C, TIAN J N, HUO Y S, et al. Effects of root pruning and shallow plowing on soil properties and plant communities in deteriorated steppe[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(11):3824-3829
- [58] JARNE A, USÓN A, REINÉ R. Management practices in mountain meadows: consequences for soil nutrient availability[J]. *Agronomy*, 2024, 14(10):2419