

DOI: 10.20103/j.stxb.202406121366

孟愉欣, 刘婉婷, 王正文, 王俊杰, 陈新栋, 王世林, 曹文侠. 氮磷施肥对退化禾草混播草地生产力和土壤理化性质的影响. 生态学报, 2025, 45(7): 3204-3217.

Meng Y X, Liu W T, Wang Z W, Wang J J, Chen X D, Wang S L, Cao W X. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on grassland productivity and soil physicochemical properties of degraded grass-mixed grasslands. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(7): 3204-3217.

氮磷施肥对退化禾草混播草地生产力和土壤理化性质的影响

孟愉欣¹, 刘婉婷², 王正文¹, 王俊杰¹, 陈新栋¹, 王世林¹, 曹文侠^{1,*}

1 甘肃农业大学草业学院, 草业生态系统教育部重点实验室, 中-美草地畜牧业可持续发展研究中心, 兰州 730070

2 吴起县果业技术发展服务中心, 延安 717600

摘要: 施肥是恢复和提升退化草地生产力的重要措施, 但单次施肥在时间尺度上对高寒草地植被和土壤质量的影响仍不明确。旨在探究祁连山高寒区建植 20 年以上的多年生退化禾草混播草地在单次氮磷施肥后对植被和土壤理化性质的持续影响。采用随机区组试验设计, 设置四个氮肥水平 (N_0 : 0 kg N/hm², N_1 : 50 kg N/hm², N_2 : 100 kg N/hm², N_3 : 200 kg N/hm²) 和四个磷肥水平 (P_0 : 0 kg P₂O₅/hm², P_1 : 65 kg P₂O₅/hm², P_2 : 117 kg P₂O₅/hm², P_3 : 210 kg P₂O₅/hm²), 氮磷施肥组合共 16 种处理。评估了施肥当年 (2021 年) 和第三年 (2023 年) 的草地生产力和土壤理化特性。结果显示, 2021 年, 高氮水平 (N_3) 显著提高地上生物量 (AGB), 并增加了土壤有机质 (SOM)、速效氮 (AN) 和速效磷 (AP) 含量; 2023 年, 高磷水平 (P_2 和 P_3) 的 AGB 显著高于其他处理, 并显著提升了 AN、AP 和全磷 (TP) 含量。氮肥、磷肥分别于 AGB、SOM、AN 显著相关; 磷肥还与 AP 和 TP 显著相关; 氮磷交互显著影响 SOM 和全氮 (TN) 含量; 年际分别与 AGB、SOM、AN 显著相关。2021 年, 氮肥和磷肥对所有指标均有促进作用; 2023 年磷肥对 AGB、SOM 和 TN 仍有显著促进作用, 而氮肥效果不显著, 表明磷肥的遗留效应大于氮肥。结构方程模型显示, 氮肥对 2021 年 AGB 有直接影响, 磷肥显著影响 2023 年 AGB, 并通过 AP 等间接提高地下生物量 (BGB)。综上, 施肥当年氮肥占主导作用, 高氮中磷 (200 kg N/hm² 和 117 kg P₂O₅/hm²) 模式效果最佳; 施肥第三年磷肥的肥效仍在发挥作用, 低氮高磷 (50 kg N/hm² 与 117 和 210 kg P₂O₅/hm²) 配施的持续效果更好。综合生态与经济效益, 单次高磷与低氮配施可发挥施肥的增产作用和更稳定持续的遗留效应。本研究结果可为高寒地区退化禾草混播草地培育复壮实践提供重要参考。

关键词: 氮磷施肥; 混播草地; 草地生产力; 土壤理化性质; 施肥遗留效应

Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on grassland productivity and soil physicochemical properties of degraded grass-mixed grasslands

MENG Yuxin¹, LIU Wanting², WANG Zhengwen¹, WANG Junjie¹, CHEN Xindong¹, WANG Shilin¹, CAO Wenxia^{1,*}

1 College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education, Sino-U. S. Centers for Grazingland Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China

2 Wuqi County Fruit Industry Technology Development Service Center, Yan'an 717600, China

Abstract: Fertilization is crucial for restoring and enhancing the productivity of degraded grasslands; however, the enduring impacts of a one-time fertilizer application on the vegetation and soil quality in alpine grasslands are not well understood. This study sought to assess the long-term effects of a one-time application of nitrogen and phosphorus fertilizers on the

基金项目: 国家牧草产业技术体系 (CARS-34)

收稿日期: 2024-06-12; 网络出版日期: 2025-01-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: caowx@gsau.edu.cn

vegetation and soil physicochemical properties in alpine perennial grass-mixed grasslands that have been established for over two decades. The experiment used a randomized block design with four levels each of nitrogen (N_0 : 0, N_1 : 50, N_2 : 100, N_3 : 200 kg N/hm²) and phosphorus fertilizers (P_0 : 0, P_1 : 65, P_2 : 117, P_3 : 210 kg P₂O₅/hm²), along with their combinations, yielding a total of 16 treatment combinations. Grassland productivity and soil physicochemical properties were assessed in the first and third year after fertilization (2021 and 2023, respectively). The findings indicated that the elevated nitrogen level (N_3) notably enhanced aboveground biomass (AGB), as well as soil organic matter (SOM), available nitrogen (AN), and available phosphorus (AP) levels in 2021. The AGB was still significantly higher than the other treatments at medium and high phosphorus levels (P_2 and P_3), as well as AN, AP, and soil total phosphorus (TP) contents in 2023. There was a significant correlation between nitrogen and phosphorus fertilizers and AGB, SOM, and AN, respectively; phosphorus fertilizer showed a significant association with AP and total phosphorus (TP); nitrogen-phosphorus interactions substantially impacted SOM and total nitrogen (TN) levels, and inter-annual correlations were significantly linked to AGB, SOM, and AN, respectively. Nitrogen and phosphorus fertilizers promoted all measured indicators in 2021, while phosphorus fertilizers still significantly enhanced AGB, SOM, and TN in 2023, indicating that the legacy effect of phosphorus fertilizers was greater than that of nitrogen fertilizers. The structural equation model revealed that nitrogen fertilizer effects were most pronounced in the first year, especially at high nitrogen and medium phosphorus levels (200 kg N/hm² and 117 kg P₂O₅/hm²), whereas phosphorus fertilizer significantly influenced AGB and indirectly increased below-ground biomass via available phosphorus in 2023. The effects of phosphorus fertilizers continued into the third year, particularly with the low-nitrogen and high-phosphorus combinations (50 kg N/hm² paired with 117 and 210 kg P₂O₅/hm²), demonstrating greater endurance. Combining economic inputs, a single application of high phosphorus with low nitrogen yielded better fertilization and legacy effects. The results of the study can provide an important reference for cultivation and restoration practices in degraded mixed-grass alpine grasslands.

Key Words: nitrogen and phosphorus addition; mixed-sowing cultivated grassland; grassland productivity; soil physical and chemical properties; fertilizer legacy effect

青藏高原高寒草地约占全国草地总面积的 38%,草地在生物多样性保护和全球生物地球化学循环中发挥着关键作用^[1]。受水肥条件限制,天然草地生产力较低^[2],而混播草地较高的生物量在解决季节性牧草不平衡等方面发挥着积极作用,是未来解决我国高寒地区草畜平衡和土-草-畜系统可持续发展的重要措施之一^[3-4]。但多年生混播草地群落结构相对脆弱,疏于管理或过度放牧时容易退化,造成群落结构改变,牧草产量下降等问题。其原因主要是草地生态系统中能量和物质的输入与输出关系失调,系统平衡与稳定遭到了破坏^[5]。以往研究发现人工草地退化后土壤容重增加,含水量呈下降趋势,土壤有机碳和全氮含量下降,土壤养分大幅减少^[6-7]。通过施肥和补播等多种人工辅助式干预,以改善土壤养分条件,在恢复生产力的同时维持较理想的群落结构、物种多样性和稳定性^[8-9]。

施肥是草地生产力维持的重要环境调控措施^[10],不仅能补充土壤损失的营养,提高草地初级生产力,改善牧草营养品质^[11],而且会增加优良牧草的竞争力,改变群落结构^[12]。氮、磷是限制植物生长的主要元素,适当添加可改善土壤质量,供根系吸收养分^[13-14]。氮、磷添加可显著提高土壤团聚体稳定性,使土壤容重降低^[15-16];草地定位试验中发现,长期施用化肥可增加土壤有机质、碱解氮和全氮含量^[17],还能增加土壤中各组分有机磷含量,提高碱性磷酸酶活性及微生物丰度^[18]。然而,单次施用尿素过多虽会在短期内显著提高地上生物量,但在停止施肥两三年后植被退化更为严重^[19]。氮磷配施能提高草地生产性能及牧草的营养品质^[20],宗宁等^[21]基于连续 10 年的施肥试验发现,在第 5—10 年氮磷配施仍显著提高了地上生物量,而且磷添加还可逆转氮添加的负面影响。施肥通过养分输入,不仅能提高植物产量,还能优化植物群落多样性,并调节生态系统的地上和地下关系,这些持续影响被称为施肥的遗留效应^[22]。大多数研究集中于施肥当年效应

或连续多年施肥的效果,但长期施用化肥可能对青藏高原生态系统产生不利影响,并增加经济成本^[23]。刘泽^[24]通过研究发现,单次氮磷施肥不仅在短期内显著改善土壤质量,并对施肥后几年的土壤理化性质还有持续影响。然而,目前对氮肥和磷肥单独施用及配施对退化禾草混播草地生产力和土壤理化性质的长期持续影响和遗留效应的研究仍不深入。

为探明单次施肥对退化草地植被和土壤理化性质的持续影响,本研究以 1999 年建植的高寒区多年生退化禾草混播草地为试验对象,研究不同氮磷单施及配施对草地生产力和土壤理化性质的影响,并在单次施肥第三年监测了各处理的持续效应,探究研究区退化草地恢复的适宜施肥配比,研究结果可为高寒区退化禾草混播草地的生产力提升与草地改良提供一定参考价值。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究位于甘肃农业大学天祝高山草原生态系统试验站(37°11'52.95"N,102°47'04.13"E),海拔 2902.5 m,无绝对无霜期^[25],为大陆性高原季风气候,试验年份各月气象变化见图 1。土壤类型为高寒草甸土,主栽牧草有燕麦、垂穗披碱草、无芒雀麦、早熟禾和中华羊茅等。施肥前(2021 年)进行了土壤基况调查(表 1)。

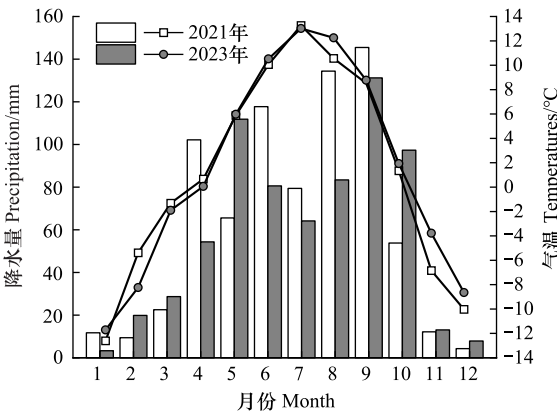


图 1 试验年份各月气温与降水变化

Fig.1 Changes in temperature and precipitation by month in the experimental year

表 1 施肥前土壤基况

Table 1 Soil basal conditions before fertilization

指标 Index	土层 Soil layer/cm		
	0—10	10—20	20—30
土壤容重 Soil bulk density/(g/cm ³)	0.93±0.01	0.89±0.01	0.92±0.02
土壤含水量 Soil moisture content/%	13.05±0.01	15.85±0.01	15.54±0.01
土壤酸碱度 pH	7.36±0.02	7.43±0.02	7.44±0.02
土壤有机质 Soil organic matter/(g/kg)	56.16±1.30	50.30±1.96	49.27±1.90
土壤速效氮 Soil available nitrogen/(mg/kg)	152.64±1.30	171.02±2.92	134.98±2.51
土壤速效磷 Soil available phosphorus/(mg/kg)	20.21±0.82	23.81±1.36	21.10±1.05
土壤全氮 Soil total nitrogen/(g/kg)	2.97±0.14	2.74±0.11	2.79±0.14
土壤全磷 Soil total phosphorus/(g/kg)	0.95±0.04	0.87±0.03	0.93±0.04

1.2 试验设计

以 1999 年在甘肃农业大学天祝高山草原生态系统试验站建植的多年生禾草混播草地为对象,混播草种为无芒雀麦(*Bromus inermis*)、冷地早熟禾(*Poa crymophila*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)和扁穗冰草(*Agropyron cristatum*),混播比例为 1:1:1:1。该研究区建植后未进行施肥等其他处理,每年生长季休牧,冷季 2—4 月轮牧,于地上剩余生物量(包括枯落物)低于 60 g/m²时停止放牧。本研究采用随机区组试验设计,试验地排除鼠害影响,小区面积均为 5 m×5 m,小区间隔 1 m。根据 DB63/T 662—2007 高寒草地施肥技术规程及德科加高寒退化人工草地的最佳施用量研究^[26]等,采用三因素试验设计,观测了施肥当年和施肥第三年草地及土壤理化性质,氮肥共设 4 个水平,分别为 N₀:0 kg N/hm²、N₁:50 kg N/hm²、N₂:100 kg N/hm²和 N₃:200 kg N/hm²;磷肥也设 4 个水平,分别为 P₀:0 kg P₂O₅/hm²、P₁:65 kg P₂O₅/hm²、P₂:117 kg P₂O₅/hm²和 P₃:210 kg P₂O₅/hm²,氮磷配施组合共 16 个处理,每个处理 3 次重复。氮肥为尿素(N≥46%),磷肥为过磷酸钙(P₂O₅≥12%)。所有肥料分 2 次撒施,每次施用量为试验设计施肥量的一半,时间分别为 2021 年 4 月和 6 月

中旬。每次施肥后灌水,消除水分不足对肥效的影响且各小区灌水量均为 2.25 kg。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 植被生物量的测定

分别在 2021 和 2023 年 8 月中旬在禾本科开花期进行生物量调查。在试验地内随机选择 1 m² 植株进行目测估计,80% 植株开始开花的日期定为开花期。在各小区中随机选取 3 个 0.5 m×0.5 m 的样方,齐地面剪得地上部分,80 ℃ 下烘至恒重称其干重为地上生物量。在已剪去生物量的样方内,用内径 10 cm 的根钻随机取 3 钻,每钻土层深度 40 cm,混合后用孔径 1.5 mm 纱网洗净后在 65 ℃ 下烘至恒重称其所有根系干重为地下生物量。

1.3.2 土壤理化性质的测定

土壤取样与植被取样同步,用直径 6 cm 根钻取 0—30 cm 土样,每 10 cm 一层,每个小区采集 3 钻,同层土壤混合后作为 1 个土样,带回实验室测定土壤养分。土壤理化性质测定参考《土壤农化分析》^[27]:容重采用环刀法;含水量采用烘干法;pH 采用酸度计测定;有机质采用外加热法;土壤速效氮采用碱解扩散法;土壤速效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法;土壤全氮采用凯氏定氮法;土壤全磷采用钼锑抗比色法测定。

1.4 统计分析

用 Microsoft Excel 2021 数据整理;用 SPSS (SPSS v 25.0, SPSS, Inc, Chicago, Illinois, USA) 软件进行三因素方差分析 (Three-way ANOVA), 显著性水平为 $P<0.05$;用 Origin 2024b 制图,图表数据为平均值±标准误;用 R 4.0.2 (R Development Core Team) piecewise SEM 包构建分段结构方程模型,探讨氮、磷单施以及配施对生物量的影响过程及其路径系数;用 TOPSIS (Technique for order preference by similarity to an ideal solution) 模型综合评价不同氮磷施肥处理对退化禾草混播草地生产力和土壤理化性质的影响。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对退化禾草混播草地生物量的影响

三因素方差分析的结果表明,地上生物量与年际 ($F=559.076, P<0.001$), 氮肥 ($F=4.821, P<0.01$), 磷肥 ($F=6.962, P<0.001$) 和年际 × 氮肥 ($F=3.977, P<0.05$) 均显著相关 (表 2)。2021 年氮肥显著增加了地上生物量 ($P<0.05$) (图 2), 各处理中 N₃P₂ 的地上生物量最佳, 高达 465.01 g/m²。单次氮磷施肥在 2023 年仍维持了对地上生物量不同程度的提升效果, 较不施肥处理有 1.95%—48.82% 的提升, 其中年际 × 磷肥 ($F=1.295, P>0.05$) 影响不显著, 说明年际间磷肥遗留效应比氮肥大。N₁P₂ 和 N₂P₃ 处理较不施肥处理地上生物量分别提高了 48.82% 和 45.16% ($P<0.05$)。地下生物量与年际 ($F=26.544, P<0.001$) 显著相关, 表现为 N₁P₃ 处理 2023 年较 2021 年地下生物量增加 70.36%。

表 2 各施肥处理年际间生物量三因素分析
Table 2 Three-way ANOVA of biomass between years for each fertilization treatment

指标 Index	效应 Parameter	<i>F</i>	<i>P</i>	指标 Index	效应 Parameter	<i>F</i>	<i>P</i>
地上生物量	年际	559.076	<0.001	地下生物量	年际	26.544	<0.001
AGB	氮肥	4.821	0.004	BGB	氮肥	0.391	0.760
	磷肥	6.962	<0.001		磷肥	0.656	0.582
	年际×氮肥	3.977	0.012		年际×氮肥	1.422	0.245
	年际×磷肥	1.295	0.284		年际×磷肥	1.024	0.388
	氮肥×磷肥	0.371	0.945		氮肥×磷肥	1.312	0.248
	年际×氮肥×磷肥	0.568	0.818		年际×氮肥×磷肥	0.743	0.669

AGB:地上生物量 aboveground biomass; BGB:地下生物量 belowground biomass

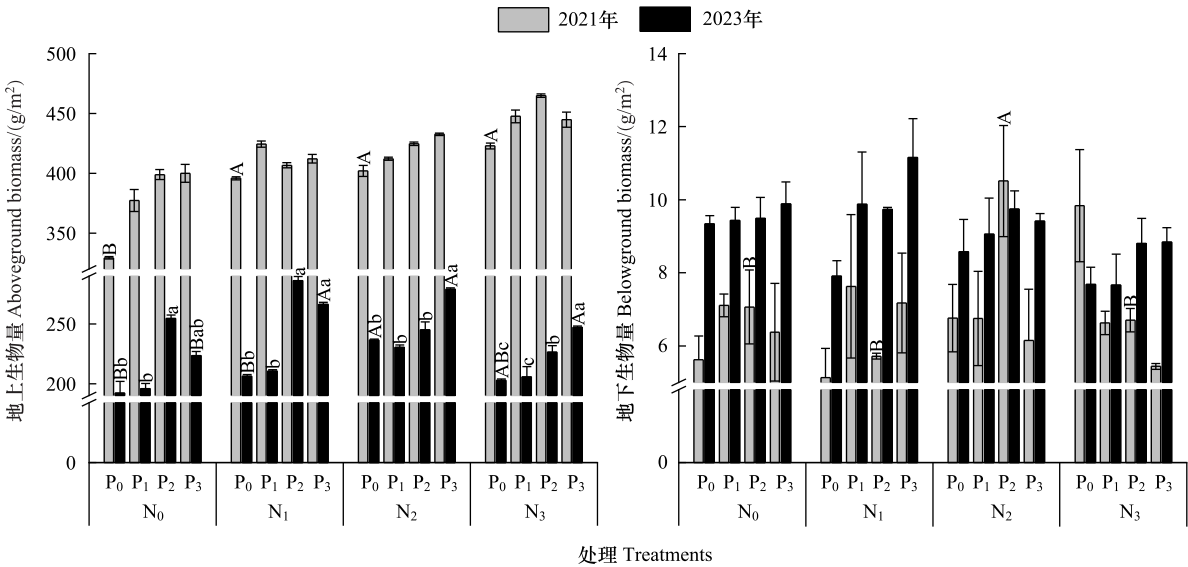


图2 各施肥处理在 2021 年和 2023 年的生物量变化

Fig.2 Biomass changes in 2021 and 2023 for each fertilization treatment

N0:0 kg N/hm²; N1:50 kg N/hm²; N2:100 kg N/hm²; N3:200 kg N/hm²; P0:0 kg P₂O₅/hm²; P1:65 kg P₂O₅/hm²; P2:117 kg P₂O₅/hm²; P3:210 kg P₂O₅/hm² 不同大写字母表示同一磷水平下不同氮水平间差异,不同小写字母表示同一氮水平下不同磷水平间差异,字母相同或无字母表示无显著差异 ($P<0.05$)

2.2 不同施肥处理对退化禾草混播草地土壤理化性质的影响

2.2.1 土壤物理性质

三因素方差分析的结果表明,土壤容重与年际显著相关 ($F=4.590, P<0.05$) (表 3),2023 年时,土壤容重在 0—10 cm 土层 P₂水平下其 N₁P₂和 N₂P₂处理显著低于 N₀P₂和 N₃P₂处理 ($P<0.05$) (图 3);10—20 cm 土层时各处理土壤容重均低于不施肥处理。土壤含水量与各因素均无显著相关性 ($P>0.05$),2021 年土壤含水量在 N₃P₀处理时最高,2023 年土壤含水量各土层下 N₃水平的变化趋势一致,均为 N₃P₁处理土壤含水量最高。

表 3 各施肥处理年际间土壤容重和含水量三因素分析

Table 3 Three-way ANOVA of SBD and SMC between years for each fertilization treatment

指标 Index	效应 Parameter	<i>F</i>	<i>P</i>	指标 Index	效应 Parameter	<i>F</i>	<i>P</i>
土壤容重	年际	4.590	0.036	土壤含水量	年际	0.488	0.487
SBD	氮肥	0.176	0.912	SMC	氮肥	1.907	0.137
	磷肥	1.103	0.354		磷肥	0.322	0.809
	年际×氮肥	0.895	0.449		年际×氮肥	0.741	0.531
	年际×磷肥	0.305	0.822		年际×磷肥	0.184	0.907
	氮肥×磷肥	0.516	0.858		氮肥×磷肥	0.477	0.885
	年际×氮肥×磷肥	0.853	0.571		年际×氮肥×磷肥	0.939	0.498

SBD:土壤容重 soil bulk density; SMC:土壤含水量 soil moisture content

2.2.2 土壤化学性质

土壤 pH 与年际 × 氮肥显著相关 ($F=4.384, P<0.01$) (表 4),2023 年单施氮肥均显著影响了各土层土壤 pH ($P<0.05$) (图 4);在 N₁水平下, pH 随着磷含量的增加呈降低趋势。0—10 cm 土层有机质与年际 ($F=15.240, P<0.001$),氮肥 ($F=3.539, P<0.05$),磷肥 ($F=2.810, P<0.05$),年际×氮肥 ($F=3.039, P<0.05$) 和氮肥

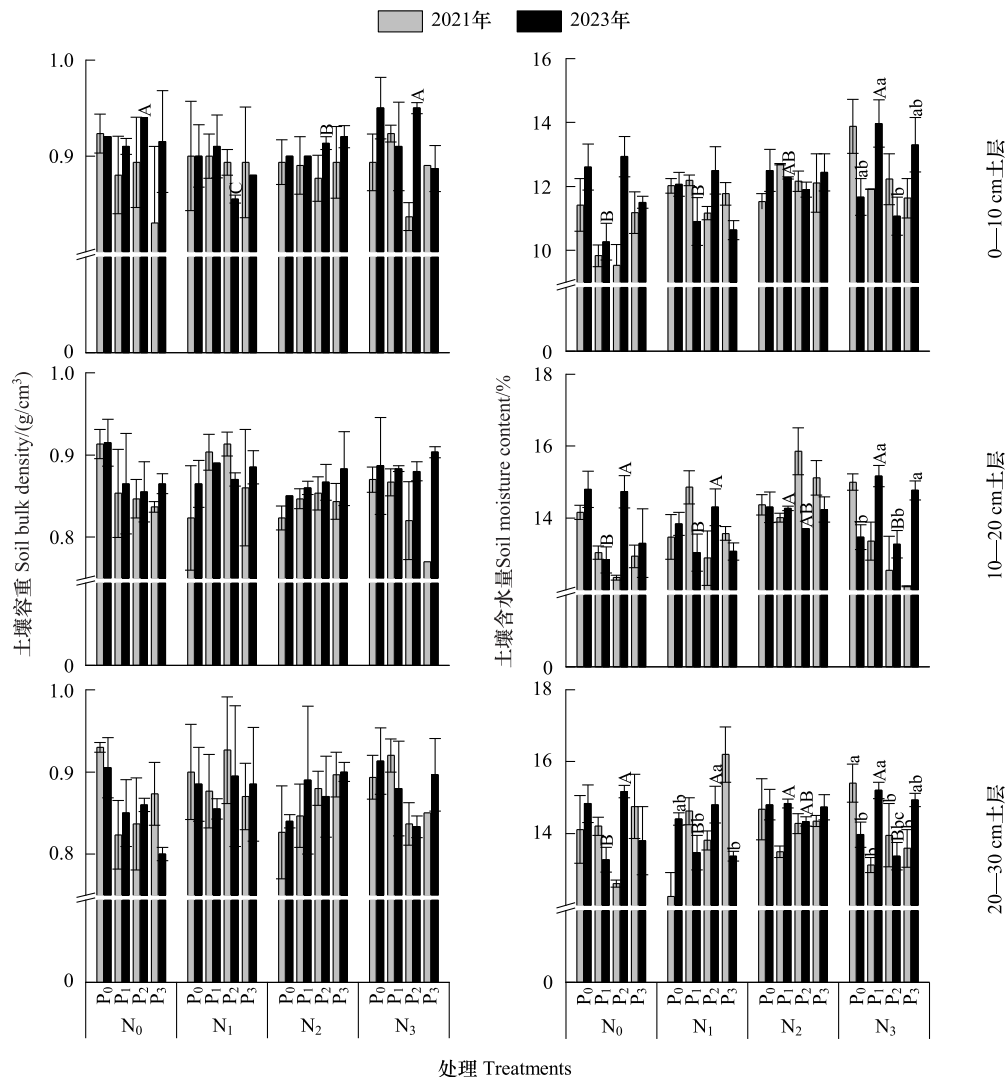


图3 各施肥处理在 2021 年和 2023 年不同土层土壤容重和含水量变化

Fig.3 Changes in SBD and SMC under different soil layers in 2021 and 2023 for each fertilizer treatment

×磷肥 ($F=2.923, P<0.01$) 均显著相关,而与年际×磷肥 ($F=0.328, P>0.05$) 的交互作用不显著,说明磷肥对土壤有机质的遗留效应大于氮肥。在 0—10 cm 土层下,2021 年 N₃P₃ 处理有机质含量高达 59.36 g/kg ($P<0.05$),2023 年 N₁P₂ 处理有机质显著高于其他各处理 ($P<0.05$)。2023 年 20—30 cm 土层下 N₀P₂ 和 N₀P₃ 处理有机质含量较不施肥处理仍提高了 30.84%—30.95% ($F=5.284, P<0.01$),配施时 N₂P₂ 和 N₃P₂ 处理也有显著提高 ($F=3.393, P<0.01$)。

三因素方差分析的结果表明,土壤速效氮与年际间有显著相关性 ($P<0.05$) (表 4)。0—10 cm 土层土壤速效氮与氮肥 ($F=13.191, P<0.001$) 和磷肥 ($F=2.851, P<0.05$) 均显著相关。2021 年,0—10 cm 土层单施磷肥时, N₀P₃ 处理土壤速效氮显著高于 N₀P₀ 和 N₀P₁ 处理 ($P<0.05$) (图 5)。土壤速效磷与磷肥在各土层下呈极显著相关 ($P<0.01$),2021 年 0—10 cm 土层 N₃ 水平下, N₃P₂ 和 N₃P₃ 处理土壤速效磷显著高于其他各处理 ($P<0.05$)。2023 年单施磷肥在各土层 P₃ 水平时土壤速效磷含量最高 ($P<0.05$) 且随磷肥施用量的增加而增加。

0—10 cm 土层全氮与年际 ($F=15.240, P<0.001$) 和磷肥 ($F=3.074, P<0.05$) 有显著相关性 (表 4)。10—20 cm 土层下,土壤全氮与年际 × 氮肥 ($F=4.448, P<0.01$) 显著相关,说明施肥后第三年氮肥对土壤全氮的贡献较低。而土壤全磷与年际间变化呈极显著相关 ($P<0.01$),与氮肥 ($F=3.320, P<0.05$) 和磷肥 ($F=4.085, P<$

0.05) 在 10—20 cm 土层下均呈显著相关。2021 年,10—20 cm 土层下,单施氮肥时 N_1 处理土壤全磷显著高于

表 4 各施肥处理年际间土壤酸碱度、有机质、速效氮、速效磷、全氮和全磷三因素分析

Table 4 Three-way ANOVA of pH, SOM, AN, AP, TN and TP between years for each fertilization treatment

指标 Index	效应 Parameter	<i>F</i>	<i>P</i>	指标 Index	效应 Parameter	<i>F</i>	<i>P</i>
土壤酸碱度 pH	年际	0.021	0.885	土壤有机质 SOM	年际	15.240	<0.001
	氮肥	0.938	0.428		氮肥	3.539	0.019
	磷肥	2.481	0.069		磷肥	2.810	0.046
	年际×氮肥	4.384	0.007		年际×氮肥	3.039	0.035
	年际×磷肥	0.353	0.787		年际×磷肥	0.328	0.805
	氮肥×磷肥	2.000	0.054		氮肥×磷肥	2.923	0.006
	年际×氮肥×磷肥	0.920	0.514		年际×氮肥×磷肥	0.990	0.457
速效氮 AN	年际	5.759	0.019	速效磷 AP	年际	0.530	0.469
	氮肥	13.191	<0.001		氮肥	1.219	0.310
	磷肥	2.851	0.044		磷肥	7.186	<0.001
	年际×氮肥	1.377	0.258		年际×氮肥	0.444	0.722
	年际×磷肥	0.569	0.637		年际×磷肥	0.246	0.864
	氮肥×磷肥	1.926	0.064		氮肥×磷肥	0.413	0.924
	年际×氮肥×磷肥	1.953	0.060		年际×氮肥×磷肥	0.133	0.999
全氮 TN	年际	5.083	0.028	全磷 TP	年际	235.136	<0.001
	氮肥	0.176	0.913		氮肥	1.042	0.380
	磷肥	3.074	0.034		磷肥	3.907	0.013
	年际×氮肥	0.999	0.399		年际×氮肥	1.688	0.178
	年际×磷肥	1.252	0.298		年际×磷肥	1.684	0.179
	氮肥×磷肥	0.999	0.450		氮肥×磷肥	0.456	0.899
	年际×氮肥×磷肥	0.707	0.700		年际×氮肥×磷肥	0.629	0.768

pH:土壤酸碱度 pH; SOM: 土壤有机质 soil organic matter; AN: 速效氮 available nitrogen; AP: 速效磷 available phosphorus; TN: 全氮 total nitrogen; TP: 全磷 total phosphorus

N_3 处理 ($P<0.05$) (图 5); 2023 年, 0—10 cm 土层下 N_1P_3 处理显著高于其他各处理, 其土壤全磷含量为 1.38 g/kg; 10—20 cm 土层时 N_1P_3 处理, 其土壤全磷含量较不施肥处理仍提高了 19.42% ($P<0.05$)。综合来看, 氮磷添加在施肥第三年低氮高磷施肥模式对土壤全效养分仍有明显的提升作用。

2.2.3 结构方程模型及 TOPSIS 综合分析

为研究 0—10 cm 土层施肥后对生物量的影响及其路径, 采用分段式结构方程模型进行分析 (图 6), 探讨氮肥、磷肥及氮磷配施通过不同路径影响生物量的过程。结果表明: 结构方程模型拟合良好 (2021 年: $P=0.071$, Fisher's $C=10.413$; 2023 年 $P=0.216$, Fisher's $C=7.822$)。2021 年氮肥对地上生物量有直接显著影响。2023 年磷肥对地上生物量有直接影响且磷肥通过影响土壤速效磷间接影响了地下生物量, 土壤含水量对地下生物量有直接负效应。通过将间接效应和直接效应求和计算总效应表明, 2021 年氮肥对地上生物量总效应为 0.6691; 2023 年磷肥对地上生物量总效应为 0.7326; 对地下生物量总效应为 1.2092。因此, 2021 年氮肥施用可直接提高地上生物量; 2023 年磷肥提高地上生物量, 还因土壤速效磷含量升高促进地下生物量随之升高。TOPSIS 综合分析表明 2021 年 N_3P_2 处理综合得分指数为 0.658 (图 7), 施肥当年高氮的施肥模式效果较好; 2023 年则为中高磷施用模式较好, 其中 N_1P_2 处理综合得分指数为 0.680。

3 讨论

3.1 氮磷施肥对退化禾草混播草地生产力的影响

化肥作为速效肥能很快溶于土壤发挥作用, 但肥效持续时间短^[28]。短期低剂量氮添加能提高草地生产

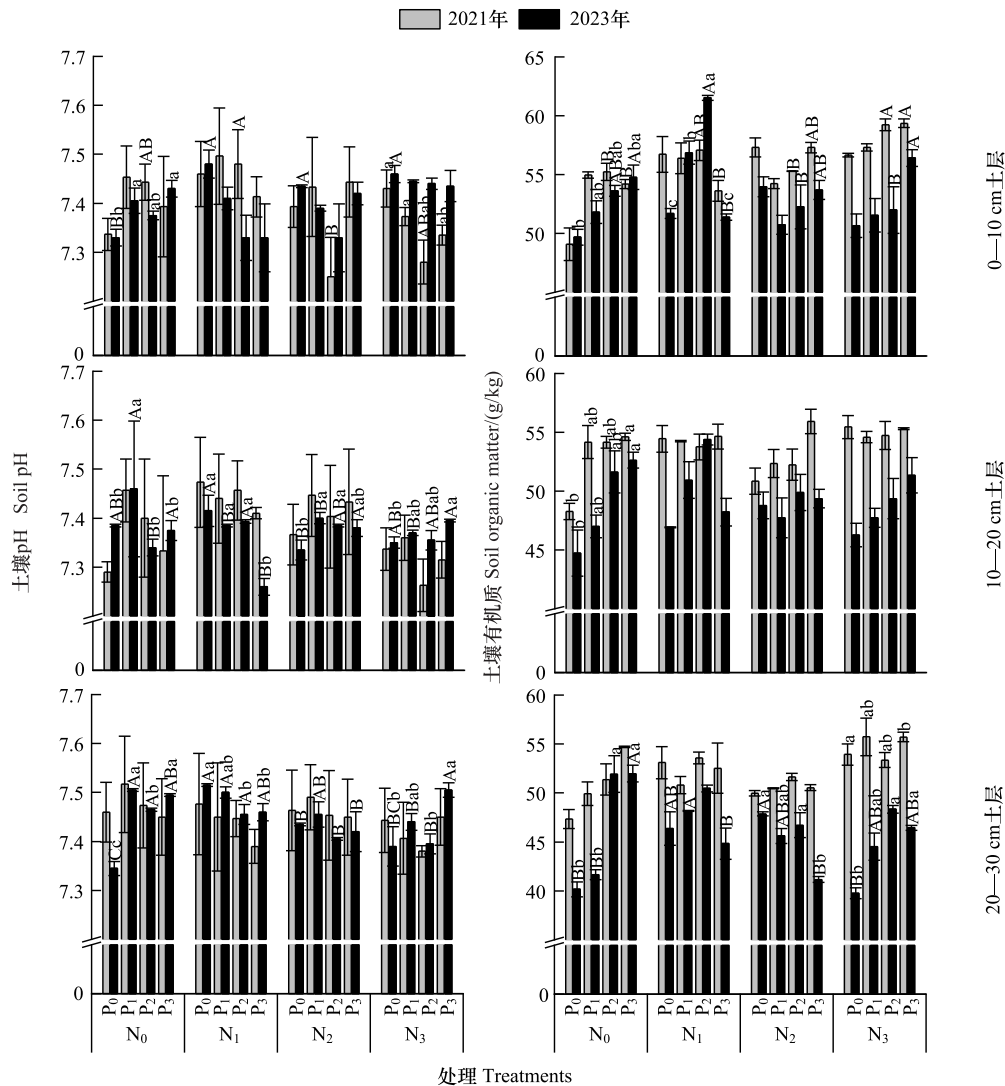


图4 各施肥处理在2021年和2023年不同土层土壤酸碱度和有机质变化

Fig.4 Changes in soil pH and SOM in different soil layers in 2021 and 2023 for each fertilizer treatment

力,而氮磷输入不平衡会改变植物养分利用策略,进而影响高寒草地生态系统的养分循环速率^[29]。因此本文研究了氮磷施肥对退化禾草混播草地的利用和土壤养分的影响,及不同施用量配施下肥效的持续性。在草地中,生物量被认为是植物生产力的合理近似值^[30]。一项 Meta 分析表明氮磷施肥可以显著增加草地生产力,且氮添加对草地生物量的影响大于磷添加^[31]。本研究施肥当年氮肥显著提高草地群落的地上生物量,高氮中磷配施效果最显著,这可能是施氮直接增加了土壤中植物可吸收利用的氮^[32],磷肥也间接促进植物对养分的吸收^[33]。然而,氮肥对草地地上生物量的影响会随着时间的推移而减弱,这表明以往的短期试验可能高估了氮添加对草地生产力的积极影响。本试验中施肥第三年低氮高磷配施对提高草地生物量仍有明显效果,这是因为过磷酸钙肥释放较慢,并通过与土壤中有效氮的降解与矿化作用调节土壤动态磷组分来促进植物养分吸收^[33-34]。在施肥第三年这种低氮高磷的配施组合提供了额外的磷输入,减轻氮诱导的磷限制^[35],所以相比单一氮肥或磷肥,这种配施具有更好的遗留作用。施肥第三年地上生物量明显降低,施肥当年高氮添加促使植物接受养分并快速生长,减少了根茎养分的储备。这也与施肥后第三年降水小于施肥第一年有关。高氮添加后两三年植物降低了耐旱阈值^[36],养分和水分对生物量的协同作用使高氮水平下生物量下降最为严重^[37-38],以后的研究还需要关注氮磷与降水的互作机制。詹书侠等^[39]发现磷添加对羊草的地下生物量影响

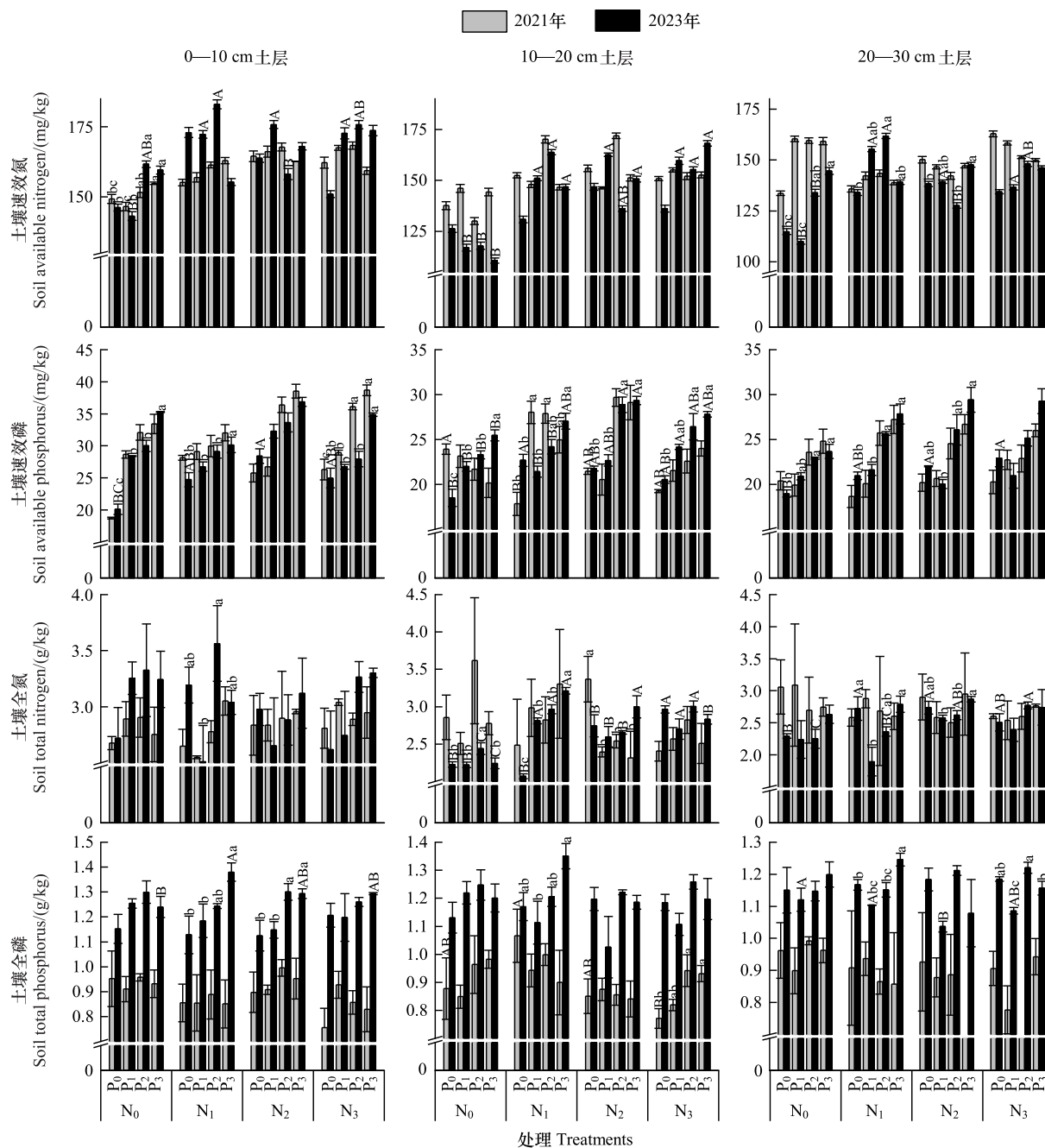


图5 各施肥处理在2021年和2023年不同土层土壤速效氮、土壤速效磷、土壤全氮和土壤全磷变化

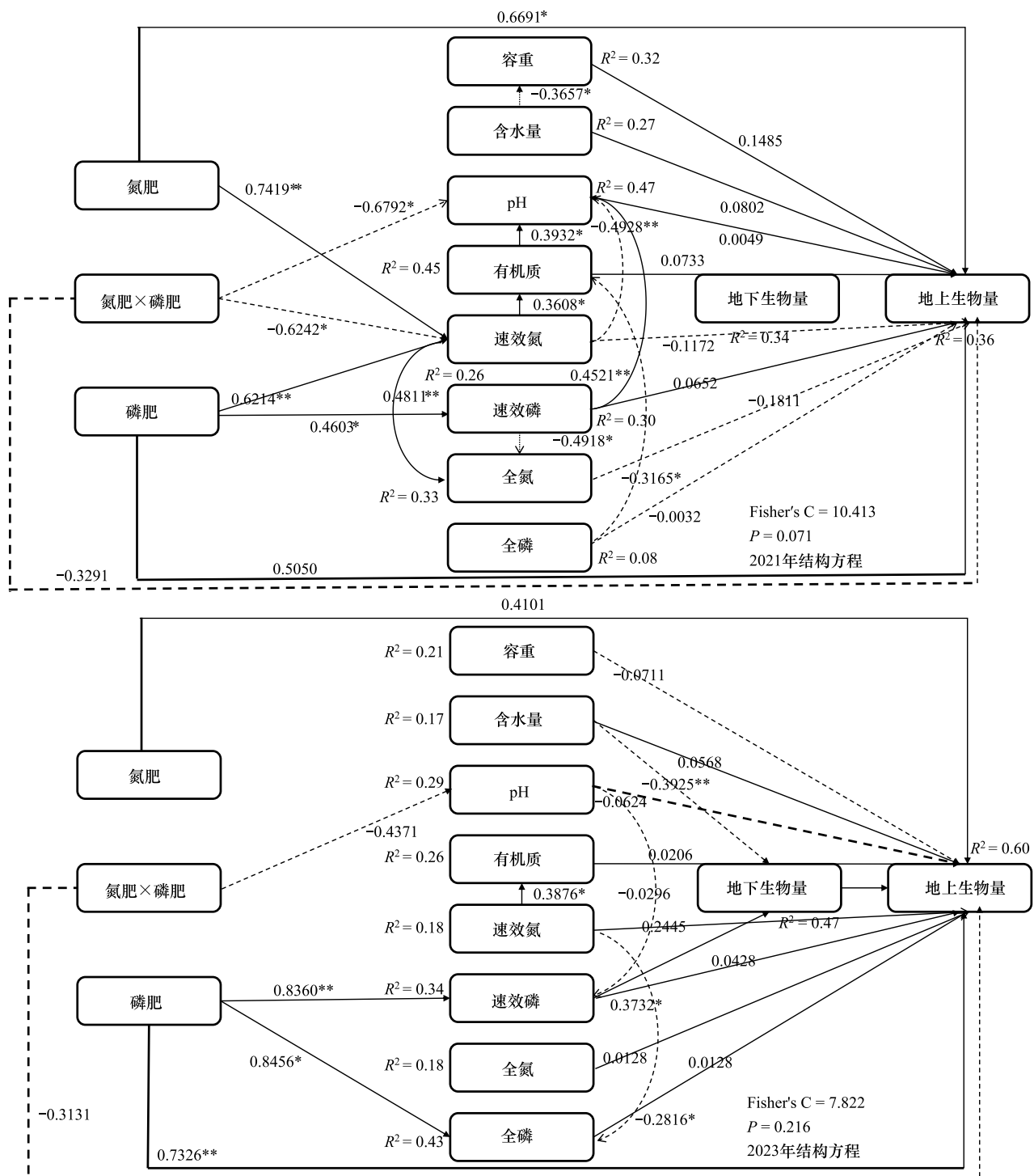
Fig.5 Changes in AN, AP, TN and TP in different soil layers in 2021 and 2023 for each fertilizer treatment

较地上生物量更大,本研究中2023年磷肥也显著提高了地下生物量,其影响大于直接对地上生物量的影响效应。随氮肥增加,磷对生产力的限制将更严重^[40],本研究表明单一氮肥在施肥当年就具有显著作用,而低氮高磷配施下施肥第三年仍能提高草地生产力。因此在高寒地区退化禾草混播草地短期施肥培育改良中应发挥磷肥遗留效应的应用。

3.2 氮磷施肥对退化禾草混播草地土壤特征的影响

土壤可直接为植物的生长发育提供必需的营养元素,化肥添加能快速溶于土壤为植物提供速效养分^[41]。但氮肥过量会使土壤养分失衡造成负效应,而氮磷的合理配施有利于提高肥料利用率^[42]。施肥第三年,土壤容重在中高磷水平下较低,这是因为中高磷通过提高地下生物量,在一定程度上促使植物根系疏松土壤^[43],

降低了表层土壤的容重。施肥后土壤含水量降低^[44],随肥效的发挥土壤含水量回升。土壤酸碱度影响植物吸收土壤养分的速率,且与土壤中大部分化学反应有很大关联。本试验发现施肥当年土壤 pH 均未表现出显著变化,而在施肥后第三年 N_1 水平下, pH 随着磷含量的增加而降低,因为随着磷肥的缓慢释放促进了土壤磷酸盐的溶解降低土壤 pH 值^[45],还有研究发现氮输入可以通过诱导硝酸盐的积累来降低土壤 pH 值^[46]。施肥后的土壤有机质来源,一方面是动植物残体和微生物固碳过程等间接作用,另一方面是外源化肥添加^[47]。施肥后土壤有机质显著提高,施肥当年高氮高磷配施下有机物输入量大对有机质提升最大^[48],第三年由于没有外源养分输入,土壤有机质含量较施肥当年有降低,说明土壤 pH 降低影响土壤中的有机质矿化^[49]。施肥当



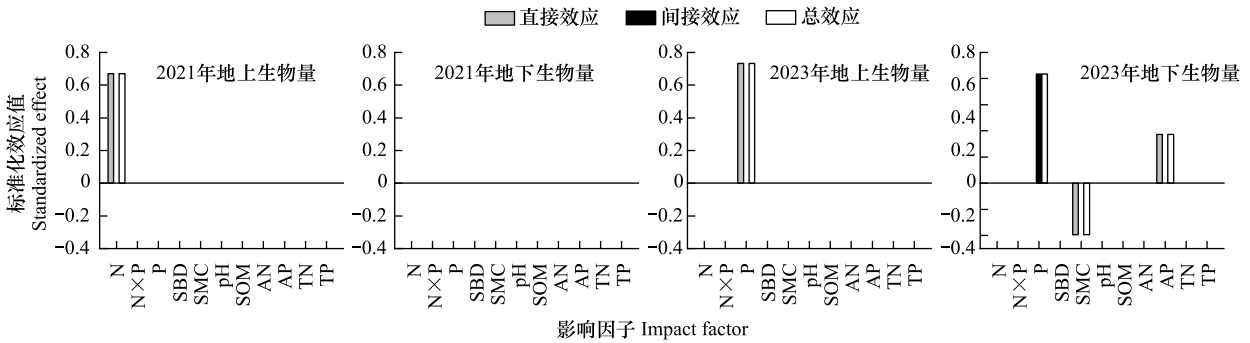


图6 结构方程模型分析施肥对生物量的影响路径及各影响因子的标准化效应值

Fig.6 Structural equation model was used to analyze the influence path of fertilization on biomass and standardized effect sizes for each impact factor

SBD;土壤容重 soil bulk density;SMC;土壤含水量 soil moisture content;SOM;土壤有机质 soil organic matter;AN;速效氮 available nitrogen;AP:速效磷 available phosphorus;TN;全氮 total nitrogen;TP;全磷 total phosphorus;实线表示显著促进作用,虚线表示显著抑制作用;星号表示显著性程度 (* $P<0.05$, ** $P<0.01$);图中仅显示显著影响路径

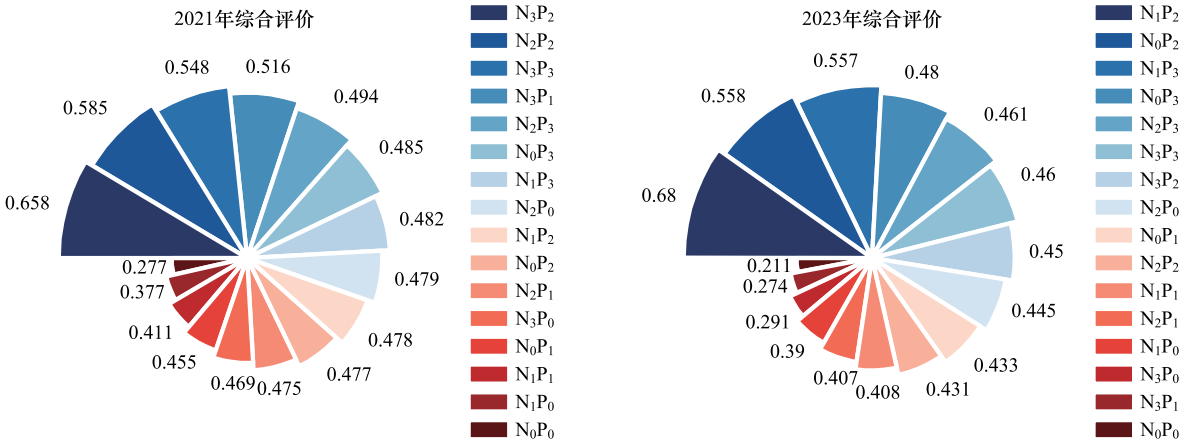


图7 不同氮磷施肥处理对高寒地区退化禾草混播草地的年际差异影响

Fig.7 Effects of different nitrogen and phosphorus fertilization treatments on interannual variation of degraded grass mixtures in alpine regions

年速效氮和速效磷均随着施肥梯度的增加而增加^[50],一方面是速效养分的直接输入,另一方面是高含量有机质的分解提高了速效养分含量^[51]。本研究结果显示施肥当年全氮含量在高氮低磷下最高,这与方昭^[52]在内蒙古草甸草原0—10 cm 土层研究结果相一致,氮素的输入给土壤氮循环添加了离子态的氮,同时刺激土壤微生物活性,加快外源养分分解使土壤全氮含量增加。而全磷含量变化不明显也说明磷元素转换慢具有滞后效应,施肥当年氮肥肥效更好,施肥第三年低氮高磷配施提升了速效养分和全效养分,这可能与氮输入诱导硝酸盐积累和降低土壤 pH 值,提高了土壤磷的有效性有关^[46]。另外,土壤 pH 的变化间接影响细菌群落,增加了碱性磷酸酶的活性^[53],提高速效磷含量。此外,磷肥的施用还可能通过提高地下生物量加强了根系固氮作用,固定更多游离态氮反馈于土壤环境^[54]。高氮与磷肥配施时,第三年的土壤养分降低最为明显,主要原因可能是高氮在施肥当年刺激植物生长,增加了土壤磷消耗^[55],也符合前面讨论的氮诱导的磷限制^[35]。说明在单次施肥下,磷肥与高氮配施虽在当年具有显著效果,但肥效释放较慢的过磷酸钙与低氮配施时对土壤养分具有最好的遗留效应。

3.3 单次氮磷施肥对退化禾草混播草地的遗留效应

分段式结构方程表明,2021 年氮肥直接影响草地地上生物量,这说明氮肥肥效快,能很快作用于植物生长。氮、磷及氮磷配施主要通过影响土壤速效养分来提高草地生产力,这是因为施肥当年氮磷添加在短期内通过改变土壤氮库来影响植物生物量的分配,且地上生物量对氮添加的响应较地下生物量更强^[56]。2023 年结构方程模型也表明,氮磷添加对生物量的促进仍存在施肥的遗留效应,这与有机畜粪和尿素在三年内仍能按比例增加其生物量的结果一致^[34]。这是因为尿素添加会立即促进地上生物量增加,在第一个生长季结束后其凋落物分解返回作用于土壤养分。此外,本研究通过 TOPSIS 综合分析表明,施肥当年 N_3P_2 处理效果最好,而施肥第三年 N_1P_2 处理最好。这说明氮肥的遗留效应较弱,第三年高磷的土壤环境减轻了氮诱导的磷限制,低氮高磷配施既能取得较高的草地生产力,又能维持较好的经济效益,是高寒区多年生退化禾草混播草地理想的施肥选择。然而,施肥对退化草地恢复是极复杂的过程,年际降水和气候变化均会影响试验结果。本研究是对退化禾草混播草地施肥试验当年和第三年的观测数据及结果分析,后续应加强连续多年观测,增肥与降水互作等研究,综合评价氮磷施肥对退化禾草混播草地恢复的影响。

4 结论

施肥当年氮肥直接影响植被地上生物量,在高氮中磷(200 kg N/hm^2 和 $117\text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{hm}^2$) 配施模式下效果最佳;施肥第三年氮磷仍能显著影响混播草地植被生物量,其中低氮高磷(50 kg N/hm^2 与 117 和 $210\text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{hm}^2$) 配施遗留效应更佳;综合生态经济效益,高寒退化禾草混播草地建议在单次施肥下选择高磷与低氮配施。本研究初步明确了单次施肥对混播草地生产力及土壤养分的影响规律,研究结果为高寒混播草地施肥培育提供重要参考。

参考文献 (References):

- [1] 杨元合,张典业,魏斌,刘洋,冯雪徽,毛超,徐玮婕,贺美,王璐,郑志虎,王媛媛,陈蕾伊,彭云峰. 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.
- [2] 陆晴,吴绍洪,赵东升. 1982—2013 年青藏高原高寒草地覆盖变化及与气候之间的关系. 地理科学, 2017, 37(2): 292-300.
- [3] 霍雅媛,曹宏,柴守玺,张述强. 不同豆禾牧草混播对土壤质地及肥力的影响. 干旱地区农业研究, 2020, 38(3): 238-244.
- [4] 张骞,马丽,张中华,徐文华,周秉荣,宋明华,乔安海,王芳,余延娣,杨晓渊,郭婧,周华坤. 青藏高寒区退化草地生态恢复: 退化现状、恢复措施、效应与展望. 生态学报, 2019, 39(20): 7441-7451.
- [5] 高丽,丁勇. 世界退化草地恢复研究和实践进展. 草业学报, 2022, 31(10): 189-205.
- [6] 邵建翔,刘育红,马辉,魏卫东. 退化高寒草地浅层土壤理化性质 Meta 分析. 草地学报, 2022, 30(6): 1370-1378.
- [7] Li Y Y, Dong S K, Wen L, Wang X X, Wu Y. Soil carbon and nitrogen pools and their relationship to plant and soil dynamics of degraded and artificially restored grasslands of the Qinghai-Tibetan Plateau. Geoderma, 2014, 213: 178-184.
- [8] Bardgett R D, Bullock J M, Lavorel S, Manning P, Schaffner U, Ostle N, Chomel M, Durigan G, Fry E L, Johnson D, Lavallee J M, Provost G L, Luo S, Png K, Sankaran M, Hou X Y, Zhou H K, Ma L, Ren W B, Li X L, Ding Y, Li Y H, Shi H X. Combatting global grassland degradation. Nature Reviews Earth & Environment, 2021, 2: 720-735.
- [9] Xu C G, McDowell N G, Fisher R A, Wei L, Sevanto S, Christoffersen B O, Weng E S, Middleton R S. Increasing impacts of extreme droughts on vegetation productivity under climate change. Nature Climate Change, 2019, 9: 948-953.
- [10] 董世魁,胡自治. 人工草地群落稳定性及其调控机制研究现状. 草原与草坪, 2000, (3): 3-8.
- [11] 王玉琴,宋梅玲,王宏生,尹亚丽,马玉寿. 添加氮素对退化高寒草地植被及营养品质的影响. 草地学报, 2021, 29(12): 2742-2751.
- [12] 刘晶晶,尹亚丽,李世雄,赵文,董怡玲,苏世锋. 不同调控措施对中度退化高寒草甸植被及土壤理化性质的影响. 草地学报, 2021, 29(9): 2074-2080.
- [13] Chu C C, Wang Y, Wang E T. Improving the utilization efficiency of nitrogen, phosphorus and potassium: current situation and future perspectives. SCIENTIA SINICA Vitae, 2021, 51(10): 1415-1423.
- [14] 阿的哈则,常涛,秦瑞敏,魏晶晶,苏洪烨,胡雪,马丽,张中华,史正晨,李珊,袁访,李宏林,周华坤. 人工草地土壤碳氮磷含量变化及化学计量特征研究. 草地学报, 2024, 32(3): 827-837.
- [15] 陈晓娟,杨建,根呷羊批,王钰,王导,杨孔,周俗. 不同施肥处理对高寒草地的影响. 西南民族大学学报(自然科学版), 2021, 47(4):

- 342-347.
- [16] Barzegar A R, Yousefi A & Daryashenas A. The effect of addition of different amounts and types of organic materials on soil physical properties and yield of wheat. *Plant and Soil*, 2002, 247(2): 295-301.
- [17] 刘学彤, 郑春莲, 曹薇, 党红凯, 曹彩云, 李晓爽, 李科江, 马俊永. 长期定位施肥对土壤有机质、不同形态氮含量及作物产量的影响. *作物杂志*, 2021(4): 130-135.
- [18] 王静, 王磊, 张爱君, 张辉, 张永春. 长期增施有机肥对土壤不同组分有机磷含量及微生物丰度的影响. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(9): 1161-1168.
- [19] Sun R B, Li W Y, Hu C S, Liu B B. Long-term urea fertilization alters the composition and increases the abundance of soil ureolytic bacterial communities in an upland soil. *FEMS Microbiology Ecology*, 2019, 95(5): 044.
- [20] 宋建超, 杨航, 鱼小军, 魏孔涛, 张小娟, 汪海波, 贺有龙. 氮磷肥配施对高寒区垂穗披碱草饲草产量及营养品质的影响. *草地学报*, 2022, 30(3): 731-742.
- [21] Zong N, Shi P L, Zheng L L, Zhou T C, Cong N, Hou G, Song M H, Tian J, Zhang X Z, Zhu J T. Restoration effects of fertilization and grazing exclusion on different degraded alpine grasslands: Evidence from a 10-year experiment. *Ecological Engineering*, 2021, 170: 106361.
- [22] Jing J Y, Cong W F, Bezemer T M. Legacies at work: plant-soil-microbiome interactions underpinning agricultural sustainability. *Trends in Plant Science*, 2022, 27(8): 781-792.
- [23] Wang D J, Zhou H K, Yao B Q, Wang W Y, Dong S K, Shang Z H, She Y D, Ma L, Huang X T, Zhang Z H, Zhang Q, Zhao F Y, Zuo J, Mao Z. Effects of nutrient addition on degraded alpine grasslands of the Qinghai-Tibetan Plateau: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 301: 106970.
- [24] 刘泽. 不同施肥处理对甘南高寒草地牧草产量及质量的影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [25] 李文, 李小龙, 刘玉祯, 王文虎, 乔欢欢, 师尚礼, 王世林, 王小军, 王金兰, 尹国丽, 曹文侠. 不同强度放牧对东祁连山高寒灌丛土壤理化特征的影响. *草原与草坪*, 2020, 40(4): 8-15.
- [26] 德科加. 施肥对三江源区高寒草甸初级生产力和土壤养分的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2014.
- [27] 鲍士旦. 土壤农化分析 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [28] 曹凤秋, 刘国伟, 王伟红, 吴学民, 刘来华. 高等植物尿素代谢及转运的分子机理. *植物学报*, 2009, 44(3): 273-282.
- [29] Liu Y L, Liu B, Yue Z W, Zeng F J, Li X Y, Li L. Effects of short-term nitrogen and phosphorus addition on leaf stoichiometry of a dominant alpine grass. *PeerJ*, 2021, 9: e12611.
- [30] Liu X, Ma Z W, Huang X T, Li L H. How does grazing exclusion influence plant productivity and community structure in alpine grasslands of the Qinghai-Tibetan Plateau? *Global Ecology and Conservation*, 2020, 23: e01066.
- [31] Li W B, Gan X L, Jiang Y, Cao F F, Lü X T, Ceulemans T, Zhao C Y. Nitrogen effects on grassland biomass production and biodiversity are stronger than those of phosphorus. *Environmental pollution*, 2022, 309: 119720.
- [32] Li W B, Huang G Z, Zhang H X. Enclosure increases nutrient resorption from senescing leaves in a subalpine pasture. *Plant and Soil*, 2020, 457: 269-278.
- [33] Liu H Y, Wang R Z, Wang H Y, Cao Y Z, Dijkstra F A, Shi Z, Cai J P, Wang Z W, Zou H T, Jiang Y. Exogenous phosphorus compounds interact with nitrogen availability to regulate dynamics of soil inorganic phosphorus fractions in a meadow steppe. *Biogeosciences*, 2019, 16(21): 4293-4306.
- [34] Kou X X, Mou X M, Xu W B, Xi S G, Yu Y W. Yak and Tibetan sheep dung increase the proportional biomass of grasses and alleviate soil nitrogen limitation in degraded Tibetan alpine grassland. *Catena*, 2024, 240: 108007.
- [35] Vitousek P M, Porder S, Houlton B Z, Chadwick O A. Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions. *Ecological applications*, 2010, 20(1): 5-15.
- [36] Li H L, Terrer C, Berdugo M, Maestre F T, Zhu Z C, Peñuelas J, Yu K L, Luo L, Gong J Y, Ye J S. Nitrogen addition delays the emergence of an aridity-induced threshold for plant biomass. *National Science Review*, 2023, 10(11): 242.
- [37] 孙岩, 何明珠, 王立. 降水控制对荒漠植物群落物种多样性和生物量的影响. *生态学报*, 2018, 38(7): 2425-2433.
- [38] 杜忠毓, 安慧, 王波, 文志林, 张雅柔, 吴秀芝, 李巧玲. 养分添加和降水变化对荒漠草原植物群落物种多样性和生物量的影响. *草地学报*, 2020, 28(4): 1100-1110.
- [39] 詹书侠, 郑淑霞, 王扬, 白永飞. 羊草的地上-地下功能性状对氮磷施肥梯度的响应及关联. *植物生态学报*, 2016, 40(1): 36-47.
- [40] Li Y, Niu S L, Yu G R. Aggravated phosphorus limitation on biomass production under increasing nitrogen loading: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 2016, 22(2): 934-943.
- [41] 王光州, 贾吉玉, 张俊伶. 植物-土壤反馈理论及其在自然和农田生态系统中的应用研究进展. *生态学报*, 2021, 41(23): 9130-9143.
- [42] 宗宁, 石培礼, 牛犇, 蒋婧, 宋明华, 张宪洲, 何永涛. 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.

- [43] 姜硕琛, 张海维, 杨迪, 胡丰琴, 邹宇傲, 杜斌, 吴启侠, 朱建强. 化肥与有机肥配施对再生稻稻田土壤容重、pH 和碳氮代谢的影响. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(7): 1053-1066.
- [44] 秦广利, 陈玉琴, 崔保伟. 长期添加外源不同有机物对土壤性状和甘薯产量的影响. 江苏农业科学, 2023, 51(17): 98-104.
- [45] Robles-Aguilar A A, Pang J Y, Postma J A, Schrey S D, Lambers H, Jablonowski N D. The effect of pH on morphological and physiological root traits of *Lupinus angustifolius* treated with struvite as a recycled phosphorus source. Plant Soil, 2019, 434: 65-78.
- [46] Wang L, Li X G, Lü J T, Fu T T, Ma Q J, Song W Y, Wang Y P, Li F M. Continuous plastic-film mulching increases soil aggregation but decreases soil pH in semiarid areas of China. Soil and Tillage Research, 2017, 167: 46-53.
- [47] 蓝贤瑾, 吕真真, 刘秀梅, 侯红乾, 冀建华, 刘益仁. 长期施肥对红壤性水稻土颗粒有机质和矿物结合态有机质含量与化学组成的影响. 土壤, 2021, 53(1): 140-147.
- [48] 鲍勇, 高颖, 曾晓敏, 袁萍, 司友涛, 陈岳民, 陈滢伊. 中亚热带 3 种典型森林土壤碳氮含量和酶活性的关系. 植物生态学报, 2018, 42(4): 508-516.
- [49] Carreira J A, Garcia-Ruiz R, Liétor J, Harrison A F. Changes in soil phosphatase activity and P transformation rates induced by application of N- and S-containing acid-mist to a forest canopy. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(13): 1857-1865.
- [50] 苏乐乐. 氮磷添加对禾豆混播草地生产力、土壤养分及微生物特性的影响[D]. 西宁: 青海大学, 2023.
- [51] 张翔. 碳氮输入增加对樟子松固沙林土壤无机磷转化的影响[D]. 合肥: 安徽大学, 2021.
- [52] 方昭. 氮磷添加对内蒙古草原植物—土壤系统碳氮分布特征的影响[D]. 咸阳: 中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2019.
- [53] Ling N, Chen D M, Guo H, Wei J X, Bai Y F, Shen Q R, Hu S J. Differential responses of soil bacterial communities to long-term N and P inputs in a semi-arid steppe. Geoderma, 2017, 292: 25-33.
- [54] 杨浩, 耿小丽, 武慧娟, 付萍, 周栋昌, 刘乾. 磷肥对甘肃临夏地区红豆草种子生产及土壤养分的影响. 草业科学, 2023, 40(3): 779-785.
- [55] Yang K, Zhu J J, Gu J C, Yu L Z, Wang Z Q. Changes in soil phosphorus fractions after 9 years of continuous nitrogen addition in a *Larix gmelinii* plantation. Annals of Forest Science, 2015, 72: 435-442.
- [56] 耿雪琪, 唐亚坤, 王丽娜, 邓旭, 张泽凌, 周莹. 氮添加增加中国陆生植物生物量并降低其氮利用效率. 植物生态学报, 2024, 48(2): 147-157.