

DOI: 10.11686/cyxb2025065

http://cyxb.magtech.com.cn

康佳惠, 郑敏娜, 龚瑞杰, 等. 氮磷添加对一年生人工草地土壤微生物-胞外酶生态化学计量特征的影响. 草业学报, 2026, 35(1): 13-24.

KANG Jia-hui, ZHENG Min-na, GONG Rui-jie, et al. Effects of nitrogen and phosphorus supplementation on ecological stoichiometric characteristics of soil microbial-extracellular enzymes in annual artificial grassland. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(1): 13-24.

氮磷添加对一年生人工草地土壤微生物-胞外酶生态化学计量特征的影响

康佳惠^{1,2}, 郑敏娜^{1,2}, 龚瑞杰³, 韩志顺^{1,2}, 陈燕妮^{1,2}, 梁秀芝^{1,2}

(1. 山西农业大学高寒区作物研究所, 山西大同 037008; 2. 农业农村部饲草高效生产模式创新重点实验室, 山西太谷 030800; 3. 山西农业大学软件学院, 山西太谷 030801)

摘要:为探讨不同氮磷水平施肥对一年生燕麦和苜蓿单播、混播人工草地土壤微生物特性的影响,本研究以燕麦、苜蓿单播及燕麦×苜蓿1:1混播3种类型的人工草地为对象,共设9个施肥处理,分别为 N_0P_0 (CK)、 $N_0P_{2.5}$ 、 N_0P_5 、 N_5P_0 、 $N_5P_{2.5}$ 、 N_5P_5 、 $N_{10}P_0$ 、 $N_{10}P_{2.5}$ 、 $N_{10}P_5$,包括3个氮肥水平(纯氮0、75和150 $kg \cdot hm^{-2}$)和3个磷肥水平(纯磷0、37.5和75 $kg \cdot hm^{-2}$),分析比较了不同氮磷添加水平下3种类型的人工草地上土壤微生物生物量碳氮磷含量、土壤胞外酶活性及其生态化学计量比的变化特征。研究表明:1)不同氮磷添加水平对土壤微生物养分代谢特征具有显著影响。在燕麦单播草地中,高氮低磷($N_{10}P_{2.5}$)的施肥处理对土壤微生物生物量碳、氮具有显著的抑制作用;在苜蓿单播草地中,低氮高磷(N_5P_5)配施有利于提升土壤微生物生物量碳、氮;在混播草地中,施肥处理对土壤微生物生物量的影响较为复杂,高磷(N_0P_5)的施肥处理对土壤微生物生物量均有抑制作用。2)燕麦单播草地中 β -1,4-葡萄糖苷酶、亮氨酸氨基肽酶和碱性磷酸酶活性受氮磷施肥处理的影响较大,而苜蓿单播草地和燕麦×苜蓿混播草地中则相对较为稳定,且3种草地类型的土壤N:P酶活性比均小于1,说明试验地土壤微生物磷限制大于氮限制。综上所述,在晋北地区燕麦单播和苜蓿单播草地生产中低氮高磷(施氮75 $kg \cdot hm^{-2}$,施磷75 $kg \cdot hm^{-2}$)配施较适宜,而在燕麦×苜蓿混播人工草地的肥料管理中,应优先考虑低氮低磷(施氮75 $kg \cdot hm^{-2}$,施磷37.5 $kg \cdot hm^{-2}$)配施。

关键词:人工草地;氮磷添加;微生物生物量碳氮磷;土壤胞外酶;生态化学计量比

Effects of nitrogen and phosphorus supplementation on ecological stoichiometric characteristics of soil microbial-extracellular enzymes in annual artificial grassland

KANG Jia-hui^{1,2}, ZHENG Min-na^{1,2}, GONG Rui-jie³, HAN Zhi-shun^{1,2}, CHEN Yan-ni^{1,2}, LIANG Xiu-zhi^{1,2}

1. High Latitude Crops Institute, Shanxi Agricultural University, Datong 037008, China; 2. Key Laboratory for Model Innovation in Forage Production Efficiency, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Taigu 030800, China; 3. School of Software, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China

Abstract: The aim of this research was to explore the effects of fertilization with different amounts of nitrogen and phosphorus on the characteristics of soil microbes. To this end, we prepared artificial grasslands with annual oat (*Avena sativa*) and alfalfa (*Medicago sativa*) grown alone as monocultures or as a mixture (1:1). The experiment consisted of a control, N_0P_0 (CK) and eight treatments, namely $N_0P_{2.5}$, N_0P_5 , N_5P_0 , $N_5P_{2.5}$, N_5P_5 , $N_{10}P_0$, $N_{10}P_{2.5}$, and $N_{10}P_5$. These treatments represented combinations of N fertilizer at three levels (elemental N at 0, 75 and 150

收稿日期:2025-03-04;改回日期:2025-04-28

基金项目:山西省基础研究计划项目(202303021222076),山西农业大学科技创新提升工程(CXGC2023076),山西农业大学生物育种工程项目(YZGC087),山西省牧草产业技术体系(2025)和大同市应用基础研究计划项目(2024062)资助。

作者简介:康佳惠(1985-),女,山西大同人,助理研究员,硕士。E-mail: kangjiahui09@163.com

kg·ha⁻¹) and phosphate fertilizer at three levels (elemental P at 0, 37.5 and 75 kg·ha⁻¹). We determined the carbon, N, and P contents in soil microbial biomass, the activities of extracellular enzymes in soil, and their ecological stoichiometric ratios in the three types of artificial grassland under the different levels of N and P fertilization. It was found that: 1) Addition of different levels of N and P significantly affected the nutrient metabolism characteristics of soil microorganisms. In the oat monoculture, the fertilization treatment with high N and low P (N₁₀P_{2.5}) had a significant inhibitory effect on the carbon and N contents of soil microbial biomass. In the alfalfa monoculture, combined application of low N and high P (N₅P₅) resulted in increased carbon and N contents in soil microbial biomass. In the oat-alfalfa mixture, the influence of fertilization treatments on soil microbial biomass was complex, but fertilization with high P (N₀P₅) had an inhibitory effect on soil microbial biomass. 2) The activities of β-1,4-glucosidase, leucine aminopeptidase, and alkaline phosphatase in the oat monoculture were greatly affected by the N and P fertilization treatments, while those in the alfalfa monoculture and the mixed oat-alfalfa grassland were relatively stable across all the treatments. The soil N:P enzyme activity ratios were lower than 1 in all three grassland types, indicating that the P limitation for soil microorganisms at the experimental site was greater than the N limitation. In summary, for grasslands in the northern part of Shanxi Province, the combined application of low N and high P (N at 75 kg·ha⁻¹ and P at 75 kg·ha⁻¹) is optimal for oat and alfalfa as monocultures. However, for mixed oat-alfalfa sowings, low N and low P (N at 75 kg·ha⁻¹ and P at 37.5 kg·ha⁻¹) should be prioritized.

Key words: artificial grassland; nitrogen and phosphorus addition; microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus; soil extracellular enzymes; ecological stoichiometric ratio

人工草地生态系统作为地球上最重要的生态系统之一,其生产力对于维持区域生态平衡和支撑畜牧业发展具有至关重要的作用^[1]。在人工草地生态系统中,一年生禾本科与豆科植物混播作为重要的饲草生产模式之一,通过生态位互补能够提高人工饲草产量,减少氮肥投入,提升地力,是国内外饲草生产上广泛采用的一种种植体系^[2-4]。然而,在全球环境变化和人类活动频繁的背景下,亦面临着如土壤养分循环失衡、生产力下降等诸多严重挑战。氮(N)和磷(P)作为人工草地的主要限制因子和关键营养元素^[5-7],科学合理的氮磷肥比对人工混播草地土壤养分有效性、土壤微生物活性及生产力具有重要影响。因此,明确一年生禾豆混作系统中物种间关系对氮磷配施的响应机制,并确定与区域环境相匹配的施肥措施成为亟待解决的问题。

科学评估氮磷配施下土壤生态系统养分循环和代谢效率是土壤管理(施肥)的重要基础。近年来,随着生态化学计量学的兴起,从生态学视角解析系统物质循环、能量流动成为众多学者^[8-10]的首选研究手段。生态化学计量学是研究生态系统各营养元素(主要是C、N、P)之间相互作用过程中的平衡和流动关系的一门科学,不仅可以揭示微生物动态调节的生态学过程,还在揭示生态系统稳态转化机制中具有重要作用^[11-12]。土壤微生物是驱动土壤碳氮磷养分释放或固持的重要调节器,生态化学计量学理论认为土壤微生物从环境中获取养分的过程存在供求平衡关系,且微生物对不同养分的需求量存在相对稳定的比例。程琪等^[13]的研究表明,化肥与有机肥料配施在增加土壤有机质和养分含量的同时,显著提高了土壤微生物生物量碳氮比,降低了微生物生物量碳磷比和微生物生物量氮磷比。童永尚等^[14]对氮添加下多年生高寒栽培草地的土壤微生物生物量碳氮磷含量及其生态化学计量特征的研究表明,随着施氮水平的提高,土壤微生物生物量碳氮比逐渐降低,微生物生物量碳磷比和微生物生物量氮磷比逐渐增加。酶化学计量比能够反映微生物群落代谢,通常用于衡量土壤养分循环状况,其中,微生物及植物根系所分泌的胞外酶是有机物分解的关键酶,其活性与植物和微生物种类以及土壤中碳、磷利用率等密切相关^[15]。李欣冉等^[16]研究发现高磷处理提高亚热带米楮(*Castanopsis carlesii*)天然林0~10 cm土壤β-葡萄糖苷酶和酸性磷酸酶活性,降低β-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶活性。孙娇等^[17]对宁夏主要类型土壤碳氮磷、微生物生物量碳氮磷、胞外酶活性及其化学计量特征的影响研究发现,施肥对土壤微生物生物量碳氮磷含量及其化学计量比影响显著,同时显著降低灰钙土亮氨酸氨基肽酶、β-乙酰葡萄糖胺糖苷酶、碱性磷酸酶活性。综上所述,众多学者们利用

生态化学计量在牧草上的应用和发现,为本研究利用生态化学计量特征解析氮磷添加对燕麦(*Avena sativa*)、苜蓿(*Medicago sativa*)单播和混播草地系统的响应机制提供了坚实的理论基础和技术参考。

基于以上所述,本研究以晋北地区燕麦单播草地、苜蓿单播草地及燕麦/苜蓿混播草地为对象,分析不同氮磷添加水平下的这 3 类人工草地上土壤微生物生物量碳氮磷含量、土壤胞外酶活性及其生态化学计量比的变化特征,旨在针对不同草地类型的特点和养分需求差异,制定合理的施肥策略,为人工草地养分调控和土壤可持续利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究样地在山西省朔州市毛皂乡山西农业大学高寒区作物研究所试验基地(地理坐标为 112°34′—114°34′ E, 39°03′—40°44′ N)。农业区划属于中温带干旱区,海拔 1040 m,年均气温为 7.8 °C,无霜期 120~150 d。试验地地力条件较为一致,土壤质地为轻壤偏沙,土壤 pH 为 8.32,耕层土壤(0~20 cm)容重为 1.45~1.51 g·cm⁻³。播种前,土壤有机质含量为 14.73 g·kg⁻¹,土壤全氮含量为 0.65 g·kg⁻¹,土壤有效磷含量为 5.19 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

于 2023 年 5—9 月进行大田试验,采用二因素随机区组设计。以燕麦(梦龙)和苜蓿(TIGRI)为试验材料,试验材料均由山西农业大学高寒区作物研究所提供。试验以山西农业大学高寒区作物研究所在山西北部农牧交错地区推广使用的播种量为基础建植人工草地,其中:燕麦单播草地(oat monoculture grassland, OMG)的播种量为 180 kg·hm⁻²,苜蓿单播草地(alfalfa monoculture grassland, AMG)的播种量为 20 kg·hm⁻²,燕麦×苜蓿 1:1 混播草地(oat×alfalfa mixed grassland, O₁A₁G)中燕麦和苜蓿的播种量分别为单播量的 50%,即 90 kg·hm⁻²和 10 kg·hm⁻²。3 种类型草地中,氮磷均各设 3 个处理水平,其中,3 个氮肥水平(纯氮 0、75 和 150 kg·hm⁻²)为主处理,3 个磷肥水平(纯磷 0、37.5 和 75 kg·hm⁻²)为副处理,共计 9 个施肥处理,试验中氮肥为尿素, N 含量 46%,磷肥为过磷酸钙, P₂O₅ 含量 12%,具体施用量见表 1。肥料在播种前一次性施入,在生长期不追肥。各小区均于 2023 年 5 月 8 日播种,9 月 10 日收获,小区面积为 15 m²(3 m×5 m),行距 25 cm,每个处理 3 次重复,共 81 个小区,其他田间管理措施基本一致。

1.3 土样采集及分析

1.3.1 土样采集 2023 年 8 月 5 日,于燕麦的蜡熟期在各试验小区采集土壤样品,四周各去除 50 cm 后,在小区内随机选择 3 个 1 m²(1 m×1 m)样方,对角线取样采集植株的根际土壤,混合去杂后取 0.2 kg 置于自封袋。将土样在 -80 °C 保存,进行各指标的测定。

1.3.2 测定指标及方法 土壤微生物生物量碳含量(soil microbial biomass carbon, SMBC)、土壤微生物生物量氮含量(soil microbial biomass nitrogen, SMBN)和土壤微生物生物量磷含量(soil microbial biomass phosphorus, SMBP)均采用氯仿熏蒸—浸提法^[18]进行测定。

β -1,4-葡萄糖苷酶(β -1,4-glucosidase, BG)以对硝基苯- β -D 吡喃葡萄糖苷为底物, N-乙酰- β -D-氨基葡萄糖苷酶(N-acetyl- β -D-glucosaminidase, NDG)以对硝基苯基-N-乙酰- β -D-氨基葡萄糖苷为底物,亮氨酸氨基肽酶(leucine aminopeptidase, LA)以 L-亮氨酸对硝基苯胺为底物,碱性磷酸酶(alkaline phosphatase, AP)以磷酸苯二钠为底物,酶活性均采用分光光度法^[19]进行测定。

土壤微生物生物量碳氮比(SMBC:SMBN)、土壤微生物生物量碳磷比(SMBC:SMBP)和土壤微生物生物

表 1 各试验小区氮、磷肥施用量

Table 1 Application amount of nitrogen and phosphate fertilizer for each test treatment (kg·hm⁻²)

处理 Treatment	纯氮 Pure nitrogen	纯磷 Pure phosphorus
N ₀ P ₀ (CK)	0	0
N ₀ P _{2.5}	0	37.5
N ₀ P ₅	0	75.0
N ₅ P ₀	75	0
N ₅ P _{2.5}	75	37.5
N ₅ P ₅	75	75.0
N ₁₀ P ₀	150	0
N ₁₀ P _{2.5}	150	37.5
N ₁₀ P ₅	150	75.0

量氮磷比(SMBN:SMBP)均参照苏乐乐等^[20]的方法计算。土壤胞外酶化学计量比各计算公式^[20]分别为:

$$\text{土壤 C:N 酶活性比} = \ln \text{BG} : \ln (\text{NDG} + \text{LA})$$

$$\text{土壤 N:P 酶活性比} = \ln (\text{NDG} + \text{LA}) : \ln \text{AP}$$

$$\text{土壤 C:P 酶活性比} = \ln \text{BG} : \ln \text{AP}$$

1.4 数据处理

利用Microsoft Excel 2016进行数据整理、图表绘制,利用SPSS 22.0软件在 $P < 0.05$ 水平进行方差分析检验不同氮、磷添加下土壤C、N和P的差异性。

2 结果与分析

2.1 不同氮磷添加水平对土壤微生物生物量碳氮磷含量及其化学计量比的影响

2.1.1 不同氮磷添加水平对土壤微生物生物量碳氮磷含量的影响 燕麦单播草地(OMG)中,与 N_0P_0 (CK)相比,各处理的SMBC含量均有不同程度的降低。其中, $N_{10}P_{2.5}$ 处理的SMBC含量最低,且与CK处理间差异显著($P < 0.05$);当氮肥水平为 N_5 时,SMBC含量随着磷肥施用量的增加呈增加趋势,但 N_5P_0 、 $N_5P_{2.5}$ 和 N_5P_5 3个处理间差异不显著($P > 0.05$)。苜蓿单播草地(AMG)中,以 $N_{10}P_5$ 处理的SMBC含量最低, N_5P_5 处理最高。燕麦×苜蓿1:1混播草地(O_1A_1G)中,与CK相比,各处理的SMBC含量均降低,其中, N_0P_5 处理的SMBC含量最低, $N_{10}P_5$ 处理次之,且与CK处理间差异显著($P < 0.05$);当氮肥水平为 N_0 时,SMBC含量随着磷肥施用水平的增加而降低(图1)。

燕麦单播草地(OMG)中,与CK相比,各处理的SMBN含量均有不同程度的降低,其中,以 $N_{10}P_{2.5}$ 处理的SMBN含量最低,且与 $N_0P_{2.5}$ 和 N_5P_5 处理差异显著($P < 0.05$);当氮肥水平为 N_0 时,SMBN含量随着磷肥施用水平的增加呈降低趋势;当磷肥水平为 $P_{2.5}$ 时,SMBN含量随着氮肥施用水平的增加而降低。苜蓿单播草地(AMG)中,则以 N_5P_5 处理的SMBN含量最高, N_0P_5 处理最低,二者之间差异显著($P < 0.05$),与CK差异不显著;当氮肥水平为 N_5 时,SMBN含量随着磷肥施用水平的增加呈增加趋势。燕麦×苜蓿1:1混播草地(O_1A_1G)中,以CK的SMBN含量最高, N_0P_5 处理的SMBN含量最低,但SMBN含量在各施肥处理中差异均不显著($P > 0.05$,图2)。

燕麦单播草地(OMG)中,SMBP含量在各施肥处理中差异均不显著($P > 0.05$);当氮肥水平为 N_0 时,SMBP含量随着磷肥的增加呈降低趋势。苜蓿单播草地(AMG)中,与CK相比,仅 $N_0P_{2.5}$ 处理的SMBP含量显著增加($P < 0.05$),其余各处理间差异不显著。燕麦×苜蓿1:1混播草地(O_1A_1G)中,SMBP含量在各施肥处理中差异均不显著;当氮肥水平为 N_0 时,SMBP含量随着磷肥的增加呈降低的趋势(图3)。

2.1.2 不同氮磷添加水平对土壤微生物生物量化学计量比的影响 为了更进一步了解土壤微生物养分代谢

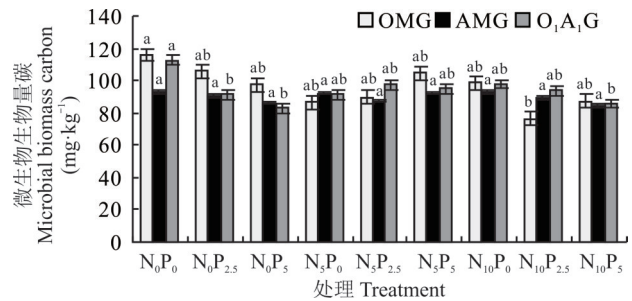


图1 不同氮磷添加水平下土壤微生物生物量碳含量

Fig. 1 Soil microbial biomass carbon content under different nitrogen and phosphorus addition levels

OMG: 燕麦单播草地 Oat monoculture grassland; AMG: 苜蓿单播草地 Alfalfa monoculture grassland; O_1A_1G : 燕麦×苜蓿(1:1)混播草地 Oat×alfalfa mixed grassland (1:1). 同一播种方式下不同字母表示差异显著($P < 0.05$),下同。Different letters of the same sowing method indicated significant difference ($P < 0.05$), the same below.

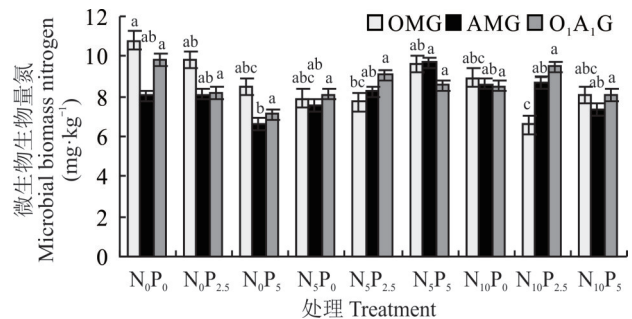


图2 不同氮磷添加水平下土壤微生物生物量氮含量

Fig. 2 Soil microbial biomass nitrogen content under different nitrogen and phosphorus addition levels

特征对氮磷添加的响应情况,本研究在 SMBC、SMBN 和 SMBP 差异分析的基础上进一步计算了土壤微生物生物量化学计量比(表 2)。燕麦单播草地(OMG)中,SMBC:SMBN 主要分布在 10.69~11.82,SMBC:SMBP 主要分布在 18.57~23.82,SMBN:SMBP 则主要集中在 1.66~2.22;苜蓿单播草地(AMG)中,SMBC:SMBN 主要分布在 9.92~13.32,SMBC:SMBP 主要分布在 14.94~21.85,SMBN:SMBP 则主要集中在 1.30~2.15;燕麦×苜

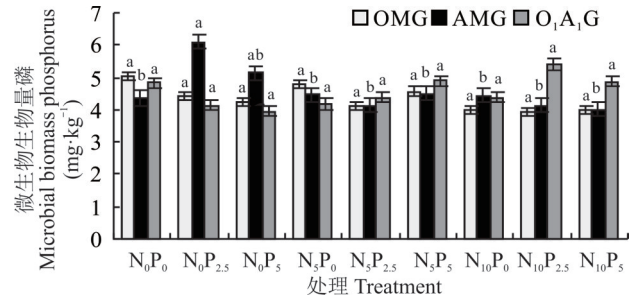


图 3 不同氮磷添加水平下土壤微生物生物量磷含量

Fig. 3 Soil microbial biomass phosphorus content under different nitrogen and phosphorus addition levels

表 2 不同氮磷添加水平下土壤微生物生物量碳、氮、磷化学计量比

Table 2 Stoichiometric ratios of soil microbial biomass of carbon, nitrogen and phosphorus under different nitrogen and phosphorus addition levels

指标 Index	处理 Treatment	OMG	AMG	O ₁ A ₁ G
土壤微生物生物量碳氮比 SMBC:SMBN	N ₀ P ₀	10.69±0.17a	11.97±1.23abc	11.69±0.94a
	N ₀ P _{2.5}	10.81±0.36a	11.28±0.81abc	11.28±0.64a
	N ₀ P ₅	11.50±0.17a	13.32±1.13a	11.69±0.56a
	N ₅ P ₀	10.92±0.35a	12.83±0.39ab	11.33±0.57a
	N ₅ P _{2.5}	11.60±0.38a	10.69±0.46bc	10.75±0.11a
	N ₅ P ₅	10.87±0.34a	9.92±0.30c	11.10±0.24a
	N ₁₀ P ₀	10.99±0.09a	10.84±0.68bc	11.53±0.44a
	N ₁₀ P _{2.5}	11.82±0.67a	10.41±0.64bc	10.12±0.89a
	N ₁₀ P ₅	10.86±0.45a	11.61±0.28abc	10.64±0.35a
土壤微生物生物量碳磷比 SMBC:SMBP	N ₀ P ₀	23.29±0.53a	17.03±0.38b	23.32±0.19a
	N ₀ P _{2.5}	23.82±0.73a	14.94±0.49c	22.11±0.10a
	N ₀ P ₅	23.09±0.54a	17.29±2.09b	20.99±0.83ab
	N ₅ P ₀	18.57±3.01c	21.67±1.11a	21.88±1.92a
	N ₅ P _{2.5}	21.70±1.24bc	21.59±1.82a	22.53±0.51a
	N ₅ P ₅	21.05±0.64bc	21.31±2.05a	20.21±1.27ab
	N ₁₀ P ₀	22.36±1.40b	21.23±1.54a	18.32±1.98b
	N ₁₀ P _{2.5}	19.35±1.68bc	21.85±1.47a	17.42±0.68b
	N ₁₀ P ₅	21.81±0.82bc	21.21±0.30a	17.72±0.74b
土壤微生物生物量氮磷比 SMBN:SMBP	N ₀ P ₀	2.18±0.07a	1.79±0.16a	2.02±0.15a
	N ₀ P _{2.5}	2.21±0.09a	1.33±0.07b	1.98±0.19a
	N ₀ P ₅	2.01±0.03ab	1.30±0.15b	1.79±0.09a
	N ₅ P ₀	1.69±0.23b	1.81±0.11a	1.94±0.09a
	N ₅ P _{2.5}	1.87±0.06ab	2.01±0.09a	2.09±0.10a
	N ₅ P ₅	2.12±0.08a	2.15±0.20a	1.83±0.21a
	N ₁₀ P ₀	2.22±0.11a	1.99±0.27a	1.94±0.08a
	N ₁₀ P _{2.5}	1.66±0.20b	2.11±0.13a	1.75±0.16a
	N ₁₀ P ₅	2.02±0.14ab	1.83±0.07a	1.67±0.20a

OMG: 燕麦单播草地 Oat monoculture grassland; AMG: 苜蓿单播草地 Alfalfa monoculture grassland; O₁A₁G: 燕麦×苜蓿(1:1)混播草地 Oat×alfalfa mixed grassland (1:1). 同列不同小写字母表示在 P<0.05 水平存在显著差异,下同。Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at P<0.05 level, the same below.

薹 1:1 混播草地(O₁A₁G)中,SMBC:SMBN 主要分布在 10.12~11.69,SMBC:SMBP 主要分布在 17.42~23.32, SMBN:SMBP 则主要集中在 1.67~2.09。

在燕麦单播草地(OMG)中和燕麦×苜蓿 1:1 混播草地(O₁A₁G)中,N 处理对 SMBC:SMBN 无显著影响。而在苜蓿单播草地(AMG)中,N₀处理下的 SMBC:SMBN 高于 N₅和 N₁₀处理,且以 N₀P₅处理的土壤 SMBC:SMBN 最高,N₅P₅处理最低,二者之间差异显著($P<0.05$)。

在燕麦单播草地(OMG)中,N₀处理下的 SMBC:SMBP 显著高于 N₅和 N₁₀处理($P<0.05$),其中,以 N₀P_{2.5}处理的 SMBC:SMBP 最高。苜蓿单播草地(AMG)中,N₀处理下的 SMBC:SMBP 显著低于 N₅和 N₁₀处理($P<0.05$),其中,以 N₀P_{2.5}处理最低,且与 N₀P₀(CK)处理和 N₀P₅处理间亦差异显著($P<0.05$)。燕麦×苜蓿 1:1 混播草地(O₁A₁G)中,则以 N₁₀处理组的 SMBC:SMBP 最低,明显低于 N₀和 N₅处理,且与 N₀处理组的 N₀P₀(CK)、N₀P_{2.5}和 N₅处理组的 N₅P₀、N₅P_{2.5}差异显著($P<0.05$)。

在燕麦单播草地(OMG)中,N₁₀P_{2.5}处理的 SMBN:SMBP 最低。而在苜蓿单播草地(AMG)中,N₀处理下 N₀P₀处理除外的 SMBN:SMBP 显著低于 N₅和 N₁₀处理,与其余各处理间有显著差异($P<0.05$)。燕麦×苜蓿 1:1 混播草地(O₁A₁G)中,N 处理对 SMBN:SMBP 无显著影响,各处理组间差异不显著。

2.2 不同氮磷添加水平对土壤胞外酶活性及其化学计量比的影响

2.2.1 不同氮磷添加水平对土壤胞外酶活性的影响

燕麦单播草地(OMG)中,各处理 BG 活性在 493~766 U·g⁻¹,其中,以 N₀P₅处理下 BG 活性最高,N₁₀P₅处理下 BG 活性最低,N₀P_{2.5}和 N₀P₅处理显著高于 N₅P₀、N₅P_{2.5}和 N₅P₅处理($P<0.05$);苜蓿单播草地(AMG)中,各处理 BG 活性分布在 425~780 U·g⁻¹,以 N₀P₀(CK)处理的 BG 活性最高,与其他处理间差异显著($P<0.05$);燕麦×苜蓿 1:1 混播草地(O₁A₁G)中,各处理 BG 活性分布在 322~802 U·g⁻¹,仍以 N₀P₀(CK)处理的 BG 活性最高,而以 N₅P₀处理最低,且显著低于其他各处理($P<0.05$,图 4A)。

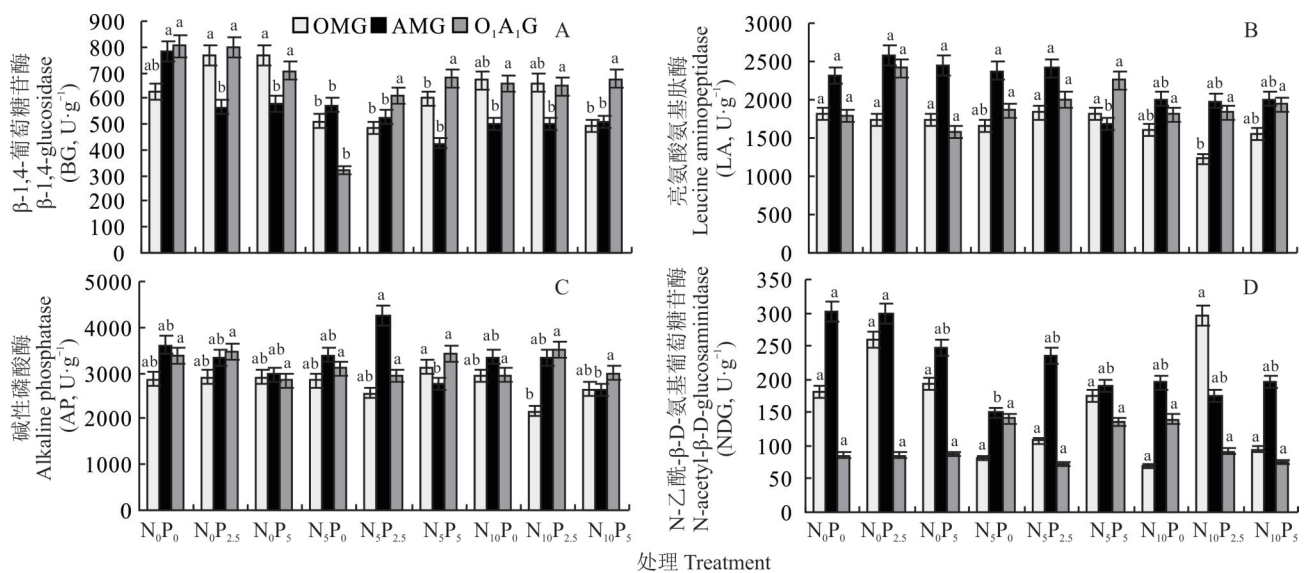


图 4 不同氮磷添加水平下土壤胞外酶活性

Fig. 4 Soil extracellular enzyme activities under different nitrogen and phosphorus addition levels

燕麦单播草地(OMG)中,各处理 LA 活性分布在 1228~1830 U·g⁻¹,其中,以 N₅P_{2.5}处理下 LA 活性最高,N₁₀P_{2.5}处理最低,且显著低于 N₀P₀(CK)、N₀P_{2.5}、N₀P₅、N₅P_{2.5}和 N₅P₅处理($P<0.05$);苜蓿单播草地(AMG)中,各处理 LA 活性为 1684~2588 U·g⁻¹,以 N₀P_{2.5}处理下 LA 活性最高,N₅P₅处理最低,且显著低于 N₀P₀(CK)、N₀P_{2.5}、N₀P₅、N₅P₀和 N₅P_{2.5}处理($P<0.05$);燕麦×苜蓿 1:1 混播草地不同氮磷施肥处理下 LA 活性为 1573~2411 U·g⁻¹,各施肥处理对 LA 活性影响均不显著(图 4B)。

燕麦单播草地(OMG)中,各处理 AP 活性分布在 2159~3124 $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$,以 N_5P_5 处理的 AP 活性最高, $\text{N}_{10}\text{P}_{2.5}$ 处理最低,其他处理下差异不显著;苜蓿单播草地(AMG)中,各处理 AP 活性分布在 2640~4248 $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$, $\text{N}_5\text{P}_{2.5}$ 处理的 AP 活性最高,其与 N_5P_5 和 N_{10}P_5 处理间差异显著($P<0.05$);燕麦×苜蓿 1:1 混播草地($\text{O}_1\text{A}_1\text{G}$)中,各处理 AP 活性则主要分布在 2833~3500 $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$,各施肥处理对 AP 活性影响均不显著(图 4C)。

燕麦单播草地(OMG)中,各处理 NDG 活性主要分布在 70~295 $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$,各施肥处理对 NDG 活性影响均不显著;苜蓿单播草地(AMG),不同氮磷施肥处理下 NDG 活性为 150~301 $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$, N_0P_0 (CK)处理的 NDG 活性最高,燕麦×苜蓿 1:1 混播草地($\text{O}_1\text{A}_1\text{G}$)中,各处理 NDG 活性分布在 72~141 $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$,各施肥处理对 NDG 活性影响均不显著(图 4D)。

2.2.2 不同氮磷添加水平对土壤胞外酶化学计量比的影响 在土壤胞外酶(BG、NDG、LA 和 AP)差异分析的基础上进一步计算了土壤胞外酶化学计量比。结果分析表明,土壤 C:N 酶活性比和土壤 C:P 酶活性比在燕麦单播草地(OMG)中, N_0 和 N_{10} 组各处理的比值高于 N_5 处理组,而土壤 N:P 酶活性比则在各处理组间无显著差异($P>0.05$)。苜蓿单播草地(AMG)中, $\text{N}_5\text{P}_{2.5}$ 处理的土壤 C:N 酶活性比显著低于 N_0P_0 ;燕麦×苜蓿 1:1 混播草地($\text{O}_1\text{A}_1\text{G}$)中, N_5P_0 则显著低于 N_0P_0 。苜蓿单播草地(AMG)和燕麦×苜蓿 1:1 混播草地($\text{O}_1\text{A}_1\text{G}$)中,土壤 C:P 酶活性比和土壤 N:P 酶活性比在各处理组间均无显著差异($P<0.05$,表 3)。

表 3 不同氮磷添加水平下土壤胞外酶化学计量比

Table 3 Soil extracellular enzyme stoichiometric ratios under different nitrogen and phosphorus addition levels

指标 Index	处理 Treatment	OMG	AMG	$\text{O}_1\text{A}_1\text{G}$
土壤 C:N 酶活性比 $\ln \text{BG} : \ln(\text{NDG} + \text{LA})$	N_0P_0	0.846±0.019abc	0.847±0.0015a	0.886±0.0120a
	$\text{N}_0\text{P}_{2.5}$	0.874±0.005ab	0.795±0.0096ab	0.862±0.0182a
	N_0P_5	0.878±0.010ab	0.805±0.0151ab	0.884±0.0135a
	N_5P_0	0.834±0.015bc	0.810±0.0107ab	0.758±0.0108b
	$\text{N}_5\text{P}_{2.5}$	0.819±0.011c	0.792±0.0130b	0.839±0.0090a
	N_5P_5	0.836±0.024bc	0.796±0.0329ab	0.837±0.0200a
	N_{10}P_0	0.875±0.010ab	0.808±0.0119ab	0.857±0.0149a
	$\text{N}_{10}\text{P}_{2.5}$	0.891±0.022a	0.808±0.0176ab	0.855±0.0095a
	N_{10}P_5	0.838±0.020abc	0.813±0.0116ab	0.852±0.0275a
土壤 C:P 酶活性比 $\ln \text{BG} : \ln \text{AP}$	N_0P_0	0.810±0.029ab	0.813±0.0036a	0.822±0.0162a
	$\text{N}_0\text{P}_{2.5}$	0.833±0.010ab	0.781±0.0068a	0.815±0.0215a
	N_0P_5	0.832±0.011ab	0.795±0.0080a	0.825±0.0122a
	N_5P_0	0.784±0.012c	0.781±0.0082a	0.791±0.0198a
	$\text{N}_5\text{P}_{2.5}$	0.786±0.015c	0.751±0.0307a	0.802±0.0032a
	N_5P_5	0.789±0.026c	0.757±0.0254a	0.800±0.0153a
	N_{10}P_0	0.814±0.009ab	0.766±0.0109a	0.813±0.0166a
	$\text{N}_{10}\text{P}_{2.5}$	0.849±0.012a	0.765±0.0153a	0.794±0.0029a
	N_{10}P_5	0.787±0.016c	0.810±0.0412a	0.809±0.0213a
土壤 N:P 酶活性比 $\ln(\text{NDG} + \text{LA}) : \ln \text{AP}$	N_0P_0	0.956±0.013a	0.961±0.0027a	0.928±0.0067a
	$\text{N}_0\text{P}_{2.5}$	0.953±0.009a	0.983±0.0034a	0.947±0.0349a
	N_0P_5	0.948±0.003a	0.988±0.0108a	0.934±0.0034a
	N_5P_0	0.940±0.008a	0.964±0.0029a	0.947±0.0128a
	$\text{N}_5\text{P}_{2.5}$	0.961±0.024a	0.947±0.0259a	0.957±0.0066a
	N_5P_5	0.944±0.005a	0.952±0.0098a	0.956±0.0055a
	N_{10}P_0	0.930±0.006a	0.948±0.0005a	0.948±0.0041a
	$\text{N}_{10}\text{P}_{2.5}$	0.953±0.013a	0.947±0.0019a	0.928±0.0137a
	N_{10}P_5	0.939±0.011a	0.995±0.0375a	0.951±0.0095a

3 讨论

3.1 不同氮磷添加水平下土壤微生物生物量碳、氮、磷的变化特征

氮磷元素作为植物生长不可或缺的营养元素,不仅是提高饲草产量的关键,也是改善土壤肥力的重要基础^[21]。土壤微生物作为植物—土壤系统循环中不可或缺的参与者,扮演着驱动土壤碳、氮、磷养分释放或固持的重要角色。它们的不同物种和功能群对土壤营养元素的利用策略存在差异,这种差异性使得土壤微生物对土壤养分的循环和转化具有独特的调节作用^[22]。

本研究通过对比不同氮磷添加水平处理下3种草地类型(燕麦单播草地、苜蓿单播草地和燕麦×苜蓿1:1混播草地)的土壤微生物生物量(SMBC、SMBN和SMBP)及其化学计量比的变化。研究结果显示,不同氮磷添加处理对土壤微生物的养分代谢特征产生了显著影响,这一发现与苏乐乐等^[20]、翟珈莹^[23]、陈懂懂等^[24]的研究结论相呼应,进一步证实了氮磷元素对土壤微生物生态功能的深刻影响。在燕麦单播草地(OMG)中,研究发现,与 N_0P_0 (CK)相比,各施肥处理的土壤微生物生物量碳(SMBC)和土壤微生物生物量氮(SMBN)含量均有不同程度的降低。其中, $N_{10}P_{2.5}$ 处理下的降低最为显著,这表明高氮高磷处理可能对燕麦单播草地的土壤微生物生物量碳、氮产生抑制作用。当氮肥水平固定为 N_5 水平时,SMBC含量随磷肥施用量的增加呈增加趋势,这说明在此氮肥水平下,磷肥的增施对SMBC的影响相对有限。对于SMBN,当磷肥水平为 $P_{2.5}$ 时,随氮肥施用水平的增加,SMBN含量显著降低,这可能与高氮处理导致的土壤氮素饱和以及微生物氮利用效率的下降有关^[25]。这一发现提示在燕麦单播草地中,应谨慎施用高氮高磷肥料,以避免对土壤微生物生态功能的负面影响。在苜蓿单播草地(AMG)中,SMBC和SMBN含量的变化趋势与燕麦单播草地有所不同。当氮肥水平为 N_5 时,SMBN含量随磷肥施用水平的增加而增加,这表明适量增施磷肥有助于提升苜蓿草地土壤微生物生物量氮。这一发现对于苜蓿草地的肥料管理具有重要的指导意义,即适量增施磷肥可以促进土壤微生物的活动,进而提高土壤的肥力和饲草的产量。对于燕麦×苜蓿1:1混播草地(O_1A_1G),与CK相比,各施肥处理的SMBC和SMBN含量亦均降低,且 N_0P_5 和 $N_{10}P_5$ 处理下降低显著。这表明混播草地在无氮或高氮处理下,土壤微生物生物量碳、氮均可能受到不利影响,在混播草地的肥料管理中,应特别注意氮素的合理施用,避免无氮或高氮处理对土壤微生物生态功能的破坏。

关于土壤微生物生物量磷(SMBP),各草地类型在不同施肥处理下的变化趋势相对复杂。在燕麦单播草地(OMG)和燕麦×苜蓿1:1混播草地(O_1A_1G)中,SMBP含量在各施肥处理间差异不显著,且当氮肥水平为 N_0 时,随磷肥施用量的增加呈降低趋势。而在苜蓿单播草地(AMG)中,仅 $N_0P_{2.5}$ 处理下SMBP含量显著增加,这可能与苜蓿作为豆科植物具有固氮能力,对磷素的需求和利用策略与燕麦有所不同有关^[26]。这一发现进一步证实了不同植物种类对土壤微生物磷素利用不同,为实际生产中制定合理的肥料管理策略提供了重要依据。

土壤微生物生物量化学计量比(SMBC:SMBN、SMBC:SMBP、SMBN:SMBP)作为反映土壤微生物群落养分利用策略和生态系统养分限制状况的重要指标,对于理解土壤微生物在生态系统中的功能和作用具有重要意义^[27]。在燕麦单播草地(OMG)中,本研究发现 N_0 处理下的SMBC:SMBP显著高于 N_5 和 N_{10} 处理。这一结果表明,在无氮处理下,土壤微生物对碳的利用效率相对较高,而对磷的利用可能受到一定限制。这可能与无氮条件下,土壤微生物为了维持其生命活动,不得不更加高效地利用有限的碳源有关。同时,磷素的缺乏也可能限制了微生物对磷的利用,导致SMBC:SMBP的升高。结果表明,在燕麦单播草地中,无氮处理可能会改变土壤微生物的养分利用策略,使其更加倾向于利用碳源。而在苜蓿单播草地(AMG)中,情况则截然不同。 N_0 处理下的SMBC:SMBP显著低于 N_5 和 N_{10} 处理。这可能与苜蓿的固氮能力及其对磷素的高需求有关。苜蓿作为豆科植物,具有固氮能力,可以在一定程度上满足其对氮素的需求。然而,磷素对于苜蓿的生长和发育同样重要,且在土壤中往往相对稀缺。因此,在氮素充足的情况下,苜蓿草地中的土壤微生物可能会更加倾向于利用磷素,导致SMBC:SMBP的降低。在燕麦×苜蓿混播草地(O_1A_1G)中,SMBC:SMBN和SMBC:SMBP的变化趋势与燕麦单播草地相似,特别是SMBC:SMBP在 N_{10} 处理下最低,且显著低于 N_0 和 N_5 处理,这一结论与苏乐乐等^[20]的研究结果有所差异,可能反映了不同研究地点、土壤条件、气候条件以及试验设计等因素对土壤微生物生物量化学计

量比的影响。这也进一步说明了土壤微生物生物量化学计量比的复杂性和多变性,需要综合考虑多种因素来深入理解和预测其变化规律。

此外,本研究还发现氮磷添加及其与燕麦、苜蓿种间的交互作用对微生物碳氮磷的影响十分复杂。氮磷元素的添加不仅直接影响了土壤微生物的生物量和活性,还可能通过改变土壤的物理化学性质、影响植物的生长和发育等方式间接影响土壤微生物的养分利用策略。同时,燕麦和苜蓿作为两种不同的植物种类,其根系分泌物、残体分解产物等也可能对土壤微生物的养分利用产生影响。综上所述,本研究通过对比不同施肥处理和不同草地类型下土壤微生物生物量化学计量比的变化,揭示了土壤微生物对碳、氮、磷等营养元素的利用策略及其受环境因素的影响。这些发现不仅加深了对土壤微生物生态功能的理解,也为实际生产中制定合理的肥料管理策略、优化草地生态系统管理提供了重要指导。未来,还需要进一步深入研究氮磷添加及其与植物种间的交互作用对土壤微生物碳氮磷的影响机制,为草地生态系统的可持续管理提供更加科学的理论依据。

3.2 不同氮磷添加水平下土壤胞外酶活性的变化特征

土壤胞外酶是评估土壤养分转化能力的重要指标^[28]。在土壤的养分循环与物质转化中,微生物会释放各种具有特定功能的胞外酶,它们各自扮演着不同的角色,其中,BG是一种关键的水解酶,负责分解纤维二糖并参与纤维素的降解^[29];NDG和LA则是以氮为分解底物的主要水解酶^[30];而AP参与土壤有机磷的矿化过程,对土壤磷素的有效性具有重要影响^[31]。

对于BG(β -葡萄糖苷酶)活性,研究结果揭示了在燕麦单播草地(OMG)中, N_0P_5 处理下BG活性达到最高,这可能与无氮条件下微生物对碳源的利用策略调整有关。在无氮或低氮环境中,微生物可能更加依赖于易分解的碳源,如纤维素等,提高BG活性。而在苜蓿单播草地(AMG)和燕麦/苜蓿混播草地(O_1A_1G)中,均以对照(CK)的BG活性最高,这表明在自然状态下,土壤微生物对碳源的利用可能更为高效和稳定。LA(亮氨酸氨基肽酶)活性在不同草地类型及施肥处理下表现出较大的变异,这反映了土壤微生物对氮素需求的适应性调整,在燕麦单播草地中, $N_5P_{2.5}$ 处理下LA活性最高,说明适中的氮磷比例可能有利于微生物对氮素的利用和蛋白质的分解。而在苜蓿单播草地中, $N_0P_{2.5}$ 处理下LA活性最高,这可能与苜蓿的固氮能力有关,在无氮条件下,微生物可能更加依赖于土壤中的有机氮源。在燕麦/苜蓿混播草地中,各施肥处理对LA活性影响均不显著,这可能表明混播草地中土壤微生物对氮素的利用相对较为稳定,受施肥处理的影响较小。对于AP(碱性磷酸酶)活性,在燕麦单播草地中, N_5P_5 处理下AP活性最高,而在苜蓿单播草地中, $N_5P_{2.5}$ 处理下AP活性最高。这说明在 N_5 处理下,植物对土壤中的磷吸收较多,导致土壤中速效磷缺乏,微生物为了获取更多的磷,会增加P获取酶(如AP)的产量。这一结论与本研究中AP活性的变化情况相一致,进一步证实了土壤胞外酶活性与土壤养分状况之间的密切关系。NDG(N-乙酰- β -D-氨基葡萄糖苷酶)活性在不同草地类型及施肥处理下表现出一定的稳定性,各处理间差异不明显。这与Sinsabaugh等^[30]的研究结论基本一致,说明NDG活性可能受土壤类型、气候条件等多种因素的共同影响,而相对独立于施肥处理。以上结果表明在研究土壤胞外酶活性时,需要综合考虑多种因素的作用。

进一步分析不同草地类型及氮磷处理下土壤胞外酶化学计量比的变化情况,发现土壤C:N酶活性比和土壤C:P酶活性比在燕麦单播草地中 N_0 和 N_{10} 组各处理的比值相对高于 N_5 处理组,这说明在 N_5 水平时,土壤中的磷含量可能成为微生物生长的限制因素,为了获取更多的磷,微生物会增加P获取酶的产量,从而导致土壤C:P酶活性比的升高。这一结论与本研究中AP活性的变化情况相呼应,进一步证实了土壤胞外酶化学计量比与土壤养分状况之间的紧密联系。而在苜蓿单播草地和燕麦/苜蓿混播草地中,各处理组间土壤胞外酶化学计量比无显著差异。这可能表明在这两种草地类型中,土壤胞外酶活性的变化相对较为稳定,受施肥处理的影响较小,也可能与这两种草地类型中土壤微生物群落的稳定性和适应性有关,使得它们能够在不同的施肥处理下保持相对稳定的酶活性和化学计量比。

本研究通过深入探讨不同草地类型及氮磷添加处理对土壤胞外酶活性和化学计量比的影响,揭示了土壤微生物对养分利用的适应性策略和土壤养分状况与胞外酶活性之间的密切关系。这些发现不仅加深了对土壤微生物生态功能的理解,也为实际生产中制定合理的肥料管理策略、优化草地生态系统管理提供了重要指导。未来,

还需要进一步深入研究土壤胞外酶活性的调控机制及其与土壤养分循环的相互作用,为草地生态系统的可持续管理提供更加科学的理论依据。

4 结论

不同氮磷添加措施对燕麦单播、苜蓿单播及燕麦/苜蓿混播人工草地的土壤微生物生物量碳氮磷、胞外酶活性及其化学计量比的影响不同。1)不同氮磷添加对土壤微生物养分代谢特征具有显著影响。在燕麦单播草地中,高氮低磷($N_{10}P_{2.5}$)的施肥处理对土壤微生物生物量具有显著的抑制作用;在苜蓿单播草地中,低氮高磷(N_5P_5)配施有利于提升土壤微生物生物量;在混播草地中,施肥处理对土壤微生物生物量的影响较为复杂。2)燕麦单播草地中 β -1,4-葡萄糖苷酶、亮氨酸氨基肽酶和碱性磷酸酶活性受氮磷施肥处理的影响较大,而苜蓿单播草地和燕麦/苜蓿混播草地中则相对较为稳定,且3种草地类型的土壤N:P酶活性比均小于1,说明试验地土壤微生物磷限制大于氮限制。综上所述,在晋北地区燕麦单播和苜蓿单播草地生产中低氮高磷(施氮 $75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,施磷 $75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)配施较适宜,而在燕麦/苜蓿混播人工草地的肥料管理中,应优先考虑低氮低磷(施氮 $75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,施磷 $37.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)配施。

参考文献 References:

- [1] Wu G L, Liu Z H, Zhang L, *et al.* Effects of artificial grassland establishment on soil nutrients and carbon properties in a black-soil-type degraded grassland. *Plant and Soil*, 2010, 333(1): 469–479.
- [2] Cao X Q, Lin Y, Zhao L J, *et al.* Effects of mixed sowing of forage oats and legumes on forage yield and stem-leaf ratio. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(11): 58–65.
曹雪乔, 林悦, 赵丽娟, 等. 饲用燕麦与豆科牧草混播对饲草产量及茎叶比的影响. *中国草地学报*, 2024, 46(11): 58–65.
- [3] Liu Q Y, Yun L, Chen Y F, *et al.* The dynamic analysis of forage yield and interspecific competition in alfalfa-grass mixed pasture. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(3): 181–191.
刘启宇, 云岚, 陈逸凡, 等. 苜蓿-禾草混播草地牧草产量及种间竞争关系的动态研究. *草业学报*, 2022, 31(3): 181–191.
- [4] Zhang Y L, Teng Z, Hao F, *et al.* Effects of different mixed sowing patterns and sowing ratios of alfalfa on grassland productivity and community stability in grass-legume mixtures. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(2): 185–197.
张永亮, 滕泽, 郝凤, 等. 苜蓿混播方式及比例对混播草地生产力和稳定性的影响. *草业学报*, 2024, 33(2): 185–197.
- [5] Qi F, Li H G, Chen W W, *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on yield of *Medicago sativa*-*Leymus chinensis* mixed grassland. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(6): 49–56.
齐非, 李海港, 陈薇薇, 等. 氮磷添加对紫花苜蓿-羊草混播草地生产力的影响. *中国草地学报*, 2024, 46(6): 49–56.
- [6] Adi H Z, Chang T, Qin R M, *et al.* Changes in soil carbon, nitrogen, phosphorus content and stoichiometric characteristics of artificial grassland soils. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(3): 827–837.
阿的哈则, 常涛, 秦瑞敏, 等. 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.
- [7] Lin W S, De K J, Zhang L, *et al.* Meta-analysis of the effects of nitrogen and phosphorus addition on the stoichiometric characteristics of soils carbon, nitrogen and phosphorus in Tibetan alpine meadow. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(12): 3345–3354.
林伟山, 德科加, 张琳, 等. 氮、磷添加对青藏高原高寒草甸土壤碳氮磷化学计量特征影响的Meta分析. *草地学报*, 2022, 30(12): 3345–3354.
- [8] Zeng D P, Jiang L L, Zeng C S, *et al.* Reviews on the ecological stoichiometry characteristics and its applications. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(18): 5484–5492.
曾冬萍, 蒋利玲, 曾从盛, 等. 生态化学计量学特征及其应用研究进展. *生态学报*, 2013, 33(18): 5484–5492.
- [9] Ma Y, Xu Z H, Zeng Q H, *et al.* Impact of nitrogen addition on stoichiometric characteristics of herbaceous species in desert steppe. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(6): 64–72.
马英, 许志豪, 曾巧红, 等. 氮素添加对荒漠化草原草本植物养分化学计量特征的影响. *草业学报*, 2021, 30(6): 64–72.
- [10] Yue K, Fornara D A, Yang W, *et al.* Effects of three global change drivers on terrestrial C:N:P stoichiometry: A global synthesis. *Global Change Biology*, 2017, 23(6): 2450–2463.
- [11] Niu S Q, Ren L N, Song L J, *et al.* Plant stoichiometry characteristics and relationships with soil nutrients in *Robinia pseudoacacia* communities of different planting ages. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(6): 355–362.

- [12] Wang S Q, Yu G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(8): 3937–3947.
王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937–3947.
- [13] Cheng Q, Mao X L, Sun T, *et al.* Effects of long-term combined application of chemical fertilizers with different organic materials on soil microbial ecological stoichiometry and community structure. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2024, 30(2): 209–220.
程琪, 毛霞丽, 孙涛, 等. 长期化肥与不同有机物料配施对土壤微生物生态化学计量特征和群落结构的影响. *植物营养与肥料学报*, 2024, 30(2): 209–220.
- [14] Tong Y S, Zhang C P, Dong Q M, *et al.* Response of soil microbial biomass and its stoichiometric characteristics to nitrogen addition in perennial alpine cultivated grassland. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2024(10): 35–42.
童永尚, 张春平, 董全民, 等. 多年生高寒栽培草地土壤微生物生物量及其化学计量特征对氮添加的响应. *中国土壤与肥料*, 2024(10): 35–42.
- [15] Zhou X M. *Kobresia meadow in China*. Beijing: Science Press, 2001.
周兴民. 中国嵩草草甸. 北京: 科学出版社, 2001.
- [16] Li X R, Lin H, Cao P L, *et al.* Long-term nitrogen application exacerbates soil phosphorus limitation at different depths in subtropical natural *Castanopsis carlesii* forest: Based on soil extracellular enzymes and their stoichiometric ratios. *Soils*, 2024, 56(5): 963–974.
李欣冉, 林浩, 曹平丽, 等. 长期施氮加剧亚热带米楮天然林不同深度土壤磷限制: 基于土壤胞外酶活性及其化学计量比角度. *土壤*, 2024, 56(5): 963–974.
- [17] Sun J, Liang J X, Li F X, *et al.* Effects of fertilization on C:N:P stoichiometry of soil, microbes and ectoenzymes in major soil types in Ningxia. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2023, 51(11): 125–135.
孙娇, 梁锦秀, 李凤霞, 等. 施肥对宁夏主要类型土壤-微生物-胞外酶化学计量特征的影响. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(11): 125–135.
- [18] Wang H. Effects of application of organic and inorganic fertilizers on vegetable $\delta^{15}\text{N}$ and soil microbial properties. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2012.
王会. 有机无机肥配施对蔬菜 $\delta^{15}\text{N}$ 和土壤生物学性质的影响. 泰安: 山东农业大学, 2012.
- [19] Verchot L V, Borelli T. Application of para-nitrophenol (pNP) enzyme assays in degraded tropical soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 37(4): 625–633.
- [20] Su L L, Qin Y, Wang Z M, *et al.* Soil nutrient and microbial activity responses to nitrogen and phosphorus addition in oats and arrowhead peas in monocrop and mixed sowings. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(3): 56–66.
苏乐乐, 秦燕, 王翌敏, 等. 氮磷添加对燕麦与箭筈豌豆不同种植方式草地土壤微生物-胞外酶化学计量特征的影响. *草业学报*, 2023, 32(3): 56–66.
- [21] Jiang H X, Liu D, Zhai G Y, *et al.* Effects of fertilizer combinations of nitrogen, phosphorus and potassium on the forage yield of *Medicago sativa*. *Pratacultural Science*, 2012, 29(9): 1441–1445.
姜慧新, 刘栋, 翟桂玉, 等. 氮、磷、钾配合施肥对紫花苜蓿产草量的影响. *草业科学*, 2012, 29(9): 1441–1445.
- [22] Shen R F, Zhao X Q. Role of soil microbes in the acquisition of nutrients by plants. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(20): 6584–6591.
沈仁芳, 赵学强. 土壤微生物在植物获得养分中的作用. *生态学报*, 2015, 35(20): 6584–6591.
- [23] Zhai J Y. Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil microbes and stoichiometric characteristic of alpine meadow in Qinghai-Tibet Plateau. Xianyang: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources), 2020.
翟珈莹. 氮磷添加对青藏高原高寒草地土壤微生物及化学计量特征的影响. 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), 2020.
- [24] Chen D D, Li Q, Chen X, *et al.* Response of soil microbial biomass C and N, C metabolism characteristics of microbes to grass-legume mixtures of annual artificial grassland in Sanjiangyuan region. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(5): 1064–1070.
陈懂懂, 李奇, 陈昕, 等. 三江源农牧交错区土壤微生物碳、氮以及群落碳代谢特征对一年生禾豆混播的响应. *草地学报*, 2018, 26(5): 1064–1070.
- [25] Hu W, Zhang Y H, Li P, *et al.* Effects of water and nitrogen supply under drip irrigation on the production performance rate and water and nitrogen use efficiency of alfalfa. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(2): 41–50.

- 胡伟, 张亚红, 李鹏, 等. 水氮供应对地下滴灌紫花苜蓿生产性能及水氮利用效率的影响. 草业学报, 2019, 28(2): 41–50.
- [26] Zheng M N, Liang X Z, Han Z S, *et al.* Effects of phosphorus application levels on phosphorus accumulation and seed yield factors of alfalfa (*Medicago sativa*). *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(1): 80–87.
郑敏娜, 梁秀芝, 韩志顺, 等. 不同磷素水平对紫花苜蓿磷累积动态和种子产量构成因子的影响. 草地学报, 2020, 28(1): 80–87.
- [27] Wang Q, Wang K Q, Song Y L, *et al.* Response of soil-microbe-extracellular enzyme stoichiometric characteristics to nitrogen deposition in a *Pinus yunnanensis* forest in central Yunnan Province, Southwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(7): 1789–1798.
王倩, 王克勤, 宋娅丽, 等. 滇中云南松林土壤-微生物-胞外酶化学计量特征对氮沉降的响应. 应用生态学报, 2024, 35(7): 1789–1798.
- [28] Xiao X Q, Zhang H K, Feng Y S, *et al.* Effects of plant residues on C:N:P of soil, microbial biomass, and extracellular enzyme in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(1): 58–66.
肖向前, 张海阔, 冯娅斯, 等. 植物残体对青藏高原高寒草甸土壤、微生物和胞外酶C:N:P化学计量特征的影响. 应用生态学报, 2023, 34(1): 58–66.
- [29] Bell C W, Acosta-Martinez V, McIntyre N E, *et al.* Linking microbial community structure and function to seasonal differences in soil moisture and temperature in a Chihuahuan desert grassland. *Microbial Ecology*, 2009, 58(4): 827–842.
- [30] Sinsabaugh R L, Shah J J F. Ecoenzymatic stoichiometry and ecological theory. *Annual Review of Ecology Evolution Systematics*, 2012, 43(1): 313–343.
- [31] Zhang X X, Yang L M, Chen Z, *et al.* Patterns of ecoenzymatic stoichiometry on types of forest soils form different parent materials in subtropical areas. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(16): 5828–5836.
张星星, 杨柳明, 陈忠, 等. 中亚热带不同母质和森林类型土壤生态酶化学计量特征. 生态学报, 2018, 38(16): 5828–5836.

**《草业学报》2025年承蒙以下专家审稿, 特此表示感谢
(以姓氏拼音为序)**

毕玉蓉	边疆晖	曹成有	陈长青	程建峰	戴其根	戴伟民	丁成龙	丁国华	董召荣
杜自强	段廷玉	方香玲	高丽倩	高学文	耿玉清	郭 丁	郭继勋	郭 龙	郭正刚
韩云华	杭苏琴	何树斌	贺 晓	胡 涛	黄晓东	贾倩民	贾善刚	井 新	雷 蕾
李 飞	李辉信	李建龙	李克梅	李万宏	李伟斌	李旭东	李彦忠	李镇清	林慧龙
蔺吉祥	凌 宁	刘慧霞	刘金荣	刘 权	刘世亮	刘文献	刘永杰	刘宇婧	刘志民
吕晓涛	马景永	马 啸	马永清	毛培胜	穆春生	庞晓攀	尚占环	邵 涛	沈禹颖
时 磊	宋秋艳	孙丽娟	田 沛	汪诗平	王虎成	王剑峰	王 俊	王丽佳	王三根
王晓娟	吴鹏飞	谢文刚	徐世健	闫 涛	杨成德	杨惠敏	杨宪龙	姚 拓	尹红菊
于 卓	袁明龙	曾彦军	张吉宇	张建国	张金屯	张 雷	张世挺	张万军	张兴旭
赵 宁	赵 祺	赵 威	朱 宏	朱剑霄					