

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.02.028

引用格式:何嘉,王圣泽,赵康,等.氮磷添加与AMF对宁夏荒漠草原优势植物生物量和C:N:P的影响[J].草地学报,2026,34(2):663–669

HE Jia, WANG Sheng-ze, ZHAO Kang, et al. Effects of Nitrogen and Phosphorus Addition and Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Biomasses and C:N:P Ratios of Dominant Plants in Desert Steppe in Ningxia[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(2):663–669

氮磷添加与AMF对宁夏荒漠草原优势植物生物量和C:N:P的影响

何嘉¹, 王圣泽¹, 赵康¹, 王红¹, 候文慧¹, 沈月^{1,2}, 杨鑫^{1,2*}

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 宁夏银川 750021; 2. 宁夏草牧业工程技术研究中心, 宁夏银川 750021)

摘要:氮磷添加是缓解温性荒漠草原生产力养分限制,提高草原生产力的重要措施之一。土壤氮磷养分富集潜在改变植物与丛枝菌根真菌(Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)的共生关系。本研究开展三因素原位控制试验,采用AMF抑菌剂添加调控AMF活性,分析氮磷添加与AMF的独立及交互效应对宁夏荒漠草原沙芦草(*Agropyron mongolicum*)与草木樨状黄芪(*Astragalus melilotoides*)生物量与C:N:P的影响。结果表明:氮磷添加显著增加沙芦草与草木樨状黄芪地上生物量。对照处理下,AMF对沙芦草与草木樨状黄芪地上生物量无显著影响;单独加磷与氮磷添加处理下,AMF显著抑制沙芦草地上生物量。AMF提高沙芦草植株C:N与草木樨状黄芪C:P。磷添加显著降低沙芦草与草木樨状黄芪C:P与N:P,缓解了沙芦草的磷限制。综上所述,与AMF相比,氮磷添加更利于宁夏荒漠草原优势植物生物量累积,缓解沙芦草与草木樨状黄芪的养分限制。

关键词:沙芦草;草木樨状黄芪;生态化学计量比;养分含量;磷限制

中图分类号:S812

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)02-0663-07

Effects of Nitrogen and Phosphorus Addition and Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Biomasses and C:N:P Ratios of Dominant Plants in Desert Steppe in Ningxia

HE Jia¹, WANG Sheng-ze¹, ZHAO Kang¹, WANG Hong¹, HOU Wen-hui¹, SHEN Yue^{1,2}, YANG Xin^{1,2*}

(1. College of Forestry and Prataculture, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 2. Ningxia Grassland and Animal Husbandry Engineering Technology Research Center, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: Nitrogen (N) and phosphorus (P) additions are vital management methods to alleviate plant nutrient limitation and improve grassland productivity. Soil nutrient enrichment may potentially alter the symbiotic relationships between plants and arbuscular mycorrhizal fungi (AMF). This study conducted a three-factor experiment to study the independent and interactive effects of N and P additions and AMF on the biomass and C:N:P of *Agropyron mongolicum* and *Astragalus melilotoides* in the desert steppe in Ningxia. We used a kind of fungicide (benomyl) to regulate native AMF activities. Our results showed that N and P additions significantly increased the aboveground biomass of *A. mongolicum* and *A. melilotoides*, but AMF did not alter them. AMF significantly reduced the aboveground biomass of *A. mongolicum* under P alone addition and both N and P addition treatments. AMF increased the C:N of *A. mongolicum* plants and the C:P of *A. melilotoides*. P addition significantly reduced the C:P and N:P of two plants, and alleviated the P limitation of *A. mongoli-*

收稿日期:2025-03-19;修回日期:2025-04-14

基金项目:国家自然科学基金(32460354);宁夏自然科学基金项目(2023AAC05012, 2023AAC03044);中国科学院“西部之光”青年学者项目(XAB2022YW15);宁夏回族自治区一流学科(草学)建设项目(NXYLXK2017A01)资助

作者简介:何嘉(2004-),女,汉族,甘肃白银人,本科生,主要从事草地管理与生态方面的研究,E-mail: hj19109439059@163.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: yangxin@nxu.edu.cn

cum. In summary, compared with AMF, N and P addition was more beneficial to dominant plants biomass in the desert steppe in Ningxia, and could alleviate the nutrient limitation of *A. mongolicum* and *A. melilotoides*.

Key words: *Agropyron mongolicum*; *Astragalus melilotoides*; Ecological stoichiometric ratio; Nutrient content; Phosphorus limitation

氮(Nitrogen, N)、磷(Phosphorus, P)是制约天然草原植物生产力的主要土壤限制因子^[1-2]。近年来,全球气候变化与人类活动引发的土壤氮、磷富集,严重影响草原生态系统中植物的生长与养分吸收利用^[3-4]。植物生态化学计量比是反映植物养分吸收利用策略的重要特征之一^[5-9]。全球整合分析发现,P添加显著降低陆地植物的N:P与C:P^[6];N添加增加植物N:P,降低C:N^[10]。土壤微生物作为草原生态系统的主要组分,能够影响植物生长,养分吸收与C:N:P生态化学计量比^[11-12]。

丛枝菌根真菌(Arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)是一类与约72%的陆地植物形成共生关系的土壤微生物^[13]。AMF通过获取植物的光合产物,帮助植物吸收N、P等元素^[13-14],促进植物生物量累积^[15]。然而,土壤养分有效性能改变AMF对植物生物量累积与养分吸收的作用强度^[16]。已有研究发现,高剂量N、P添加抑制AMF对植物生长与养分吸收的正向效应^[17-18]。此外,土壤高肥力也会严重抑制AMF自身生长及对宿主植物的侵染能力^[16]。宁夏东部荒漠草原是我国温性荒漠草原的重要组成部分,沙芦草与草木樨状黄芪是该类型草原的优势植物^[18]。然而,氮磷添加与AMF对沙芦草、草木樨状黄芪植物生物量与C:N:P的影响鲜有报道。基于上述研究,本研究提出以下科学问题:1. P肥添加是否通过降低植物N:P和C:P缓解植物P限制? 2. N、P添加是否改变AMF对植物生物量和C:N:P的作用强度?

本研究采用野外原位控制试验的方法,测定两种植物生物量、C:N:P、土壤速效N、P含量、菌根侵染率等指标,分析氮磷添加与AMF对两种植物生物量与C:N:P的影响,以期对宁夏荒漠草原生态系统养分管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于宁夏东部吴忠市盐池县宁夏大学教学科研基地(108°28'37"E, 37°80'79"N),该区域为温带大陆性气候,年均降雨量为283 mm,年均气温

为7.8℃。该试验区植被类型是温性荒漠草原,土壤类型为风沙土。试验区优势植物为沙芦草(*Agropyron mongolicum*)与草木樨状黄芪(*Astragalus melilotoides*),地上生物量分别占植物群落生物量的33.53%和17.68%。常见种包括阿尔泰狗娃花(*Aster altaicus*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、牛枝子(*Lespedeza potaninii*)、虻果芥(*Braya humilis*)等。

1.2 试验设计

本研究在天然草原采用三因素随机区组试验设计:因素一为N肥添加,N肥添加量2个水平,为0和10 g·m⁻²·a⁻¹;因素二为P肥添加,P肥添加量2个水平,为0和10 g·m⁻²·a⁻¹;因素三为AMF,设置不添加苯菌灵(benomyl)与添加苯菌灵2个水平。共8个处理,每个处理重复5次,共计40个试验小区,小区面积为2.4 m×2.4 m。N肥添加采用硝酸铵肥料(NH₄NO₃),P肥添加采用过磷酸钙肥料(Ca(H₂PO₄)₂)。N、P添加量参考Yang等^[18]、Cui等^[19]在天然草原的肥料施用量。每年草原植物生长季初期,将N肥与P肥均匀撒入试验小区。添加苯菌灵处理:在植物生长季,每15 d添加6 g·m⁻²苯菌灵(溶于10 L水);不添加苯菌灵处理,加入等量的水。苯菌灵作为专性AMF抑制剂,能显著抑制草原土壤AMF的活性与生物量^[18]。该试验于2019年生长季初期(5月)开始处理,试验时期为2019—2023年。

1.3 指标选择及测定方法

(1)植物地上生物量:在2023年植物生长季末期(8月20日),在每个试验小区采用0.5 m×1 m的样方框,齐地面刈割样方内沙芦草与草木樨状黄芪地上部植株^[18]。植株样品分装于纸袋后,放置于105℃烘箱杀青0.5 h,其后放置于65℃烘箱连续烘干48 h,并称其干重(g)^[18]。

(2)植物地上植株C、N、P含量:植物干样经研磨机粉碎后,采用有机元素分析仪(Unicube; Elementar, Germany)测定植物样品的C和N含量。植物粉碎样品经H₂SO₄-H₂O₂消煮后,采用钒钼黄比色法,测定植物样品的P含量。

(3)土壤无机氮含量与速效磷含量:每个试验小区的样方框内,采用内径5 cm土钻取2钻根土混合物样品,取土深度为0~10 cm。将2钻根土混合物样品混合后,采用2 mm孔径筛网过筛,去除根系与石子后,获得100 g土壤样品。50 g土壤样品放置4℃冰箱保存,用于测定土壤无机氮含量。50 g土壤样品风干处理后,用于测定土壤速效磷含量。获取测定采用连续流动分析仪(San++Advanced; Skalar, France)测定试验小区的土壤无机氮含量。采用Olsen法测定土壤速效磷含量。

(4)菌根侵染率:在每个试验小区内,随机选取2株长势相似的沙芦草与草木樨状黄芪,小心挖掘植物根系。使用去离子水将植物根系样品清洗后,剪切成0.5 cm根段。采用10% KOH溶液中90℃水浴3h,实现根系脱色;经2% HCl溶液酸化、5% 曲利苯蓝染色后,每个处理随机选取30个根段,采用显微镜镜检法,测定每个处理沙芦草与草木樨状黄芪的菌根侵染率。

1.4 数据分析

采用三因素方差分析(Three-way ANOVA)检验氮添加、磷添加、AMF及交互作用对沙芦草与草木樨状黄芪生物量、养分含量、养分化学计量比、土

壤速效养分含量与菌根侵染率的影响。试验数据采用Excel 2015软件汇总整理,采用SigmaPlot 12.0软件作图。采用IBM SPSS Statistics(27.0)软件进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 N、P添加与AMF对沙芦草和草木樨状黄芪地上生物量的影响

P添加与AMF的交互作用显著改变沙芦草地上生物量(图1A, $AMF \times P: P < 0.01$);不加P处理下,添加苯菌灵对沙芦草地上生物量无显著影响;加P处理下,添加苯菌灵显著抑制沙芦草地上生物量。N添加与P添加的交互作用显著改变沙芦草与草木樨状黄芪地上生物量(图1A,B, $N \times P: P < 0.05$)。不加P处理下,N添加使沙芦草地上生物量增加72.90%;加P处理下,N添加使沙芦草地上生物量增加70.04%(图1A)。不加P处理下,N添加使草木樨状黄芪地上生物量降低56.56%;加P处理下,N添加使草木樨状黄芪地上生物量降低59.56%(图1B)。与对照处理相比,单独添加P处理使草木樨状黄芪地上生物量提高近10倍(图1B)。添加苯菌灵对草木樨状黄芪地上生物量无显著影响(图1B)。

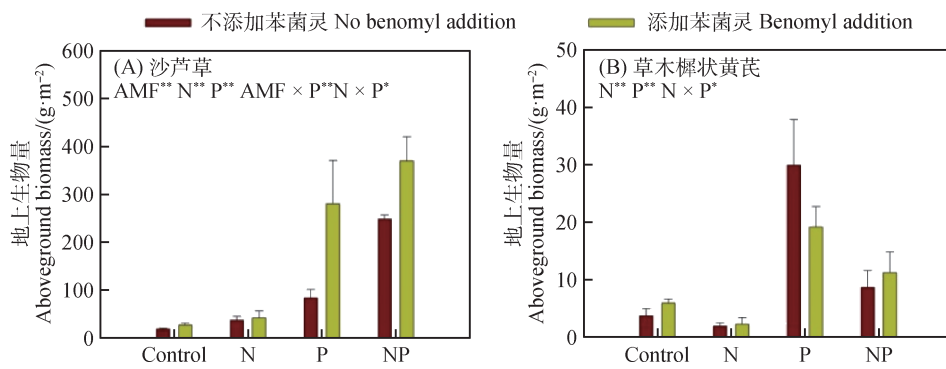


图1 氮磷添加与AMF对沙芦草和草木樨状黄芪地上生物量的影响

Fig. 1 Effects of N and P additions and AMF on the aboveground biomass of *A. mongolicum* and *A. melilotoides*

注:Control代表不添加氮磷肥,N代表单独添加氮肥,P代表单独添加磷肥,NP代表同时添加氮磷肥。黑色柱子代表不添加苯菌灵(不抑制AMF活性),灰色柱子代表添加苯菌灵(抑制AMF活性)**,*分别表示试验因素独立效应与交互效应差异极显著($P < 0.01$),显著($P < 0.05$)。下图同

Note: Control, without N and P additions; N, N addition; P, P addition; NP, N and P combined addition. Brown bars, no benomyl addition; Yellow bars, benomyl addition. ** and * indicate the independent and interactive effects of experimental factors were significantly different at the 0.01 and 0.05 level, respectively. The same as below

2.2 N、P添加与AMF对沙芦草和草木樨状黄芪养分含量与化学计量比的影响

NP添加显著增加沙芦草植株C含量(图2A, $P < 0.05$)对草木樨状黄芪植株C含量无显著影响(图2B)。N添加显著增加沙芦草植株N含量,添加苯菌灵显著增加沙芦草植株N含量(图2C, $P < 0.01$)。NP添加与

AMF对草木樨状黄芪植株N含量无显著影响(图2D)。P单独添加使沙芦草、草木樨状黄芪植株P含量分别增加103.30%与24.34%(图2E-F, $P < 0.01$)。不加P处理下,添加苯菌灵显著增加草木樨状黄芪植株N含量;加P处理下,添加苯菌灵对草木樨状黄芪植株N含量无显著影响(图2D)。

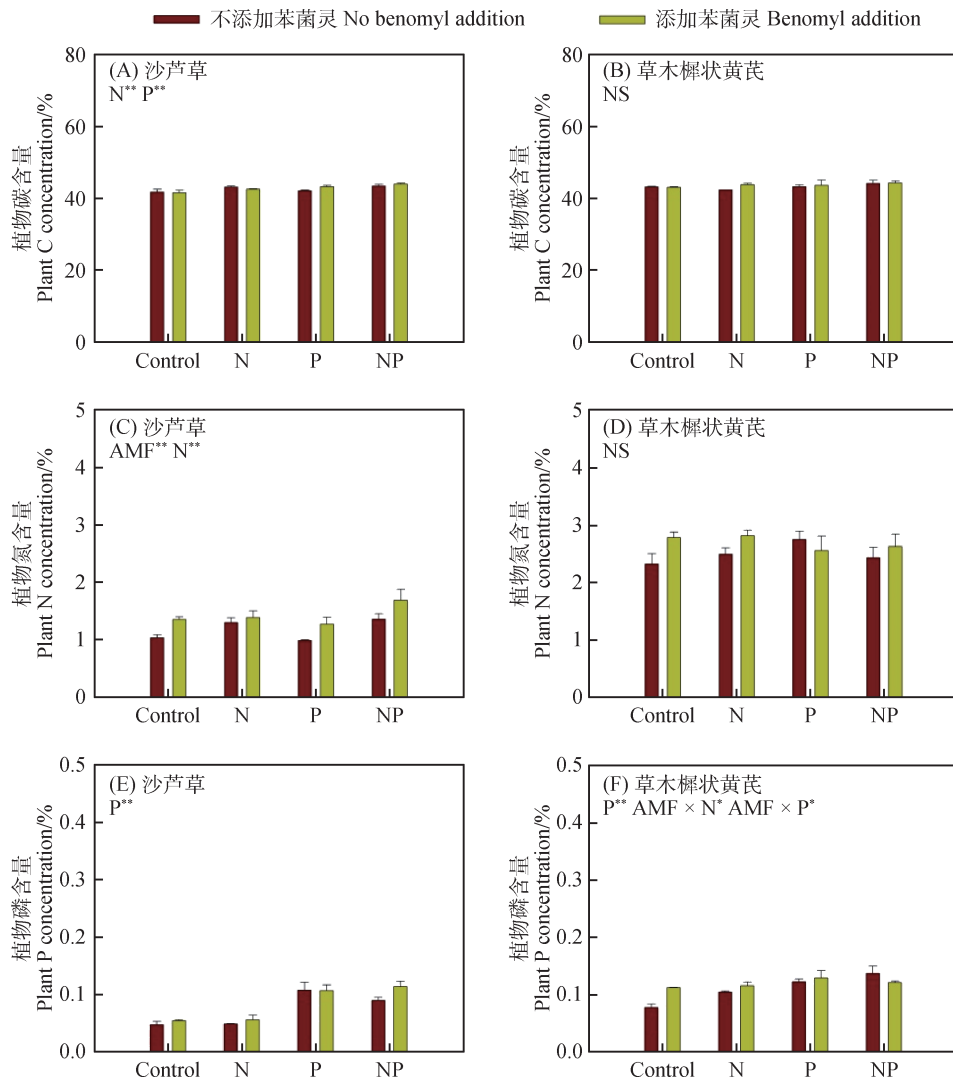


图 2 氮磷添加与 AMF 对沙芦草和草木樨状黄芪养分含量的影响

Fig. 2 Effects of N and P additions and AMF on the nutrient content of *A. mongolicum* and *A. melilotoides*

N 添加与苯菌灵添加显著降低沙芦草植株 C:N (图 3A, $P < 0.01$), 对草木樨状黄芪植株 C:N 无显著影响 (图 3B)。P 添加使沙芦草植株 C:P 极显著降低 41.16% (图 3C, $P < 0.01$), 草木樨状黄芪植株 C:P 极显著降低 19.28% (图 3D, $P < 0.01$)。对照处理, 添加苯菌灵显著降低沙芦草与草木樨状黄芪 C:P (图 3C-D)。N 添加处理显著增加沙芦草植株 N:P, 对草木樨状黄芪 C:P 无显著影响 (图 3E-F)。P 添加显著降低沙芦草与草木樨状黄芪植株 N:P (图 3E-F, $P < 0.01$)。P 添加处理使沙芦草植株 N:P < 14 , 使沙芦草植株由“P 限制”转变为“N 限制” (图 3E)。AMF 对沙芦草与草木樨状黄芪植株 N:P 无显著影响 (图 3E-F)。

2.3 N、P 添加与 AMF 对土壤速效养分含量的影响

N 添加的主效应使土壤无机 N 含量显著增加 31.14%, P 添加与苯菌灵添加对土壤无机 N 含量无显

著影响 (图 4A)。P 添加显著增加土壤速效 P 含量, N 添加与苯菌灵添加对土壤速效 P 含量无显著影响 (图 4B)。

2.4 N、P 添加与 AMF 对沙芦草和草木樨状黄芪菌根侵染率的影响

P 与苯菌灵添加抑制沙芦草和草木樨状黄芪菌根侵染率 (图 5, AMF: $P < 0.01$)。在对照处理, 苯菌灵添加处理使沙芦草和草木樨状黄芪菌根侵染率分别下降 21.75% 与 27.15%。与不加 P 处理相比, P 添加处理使沙芦草和草木樨状黄芪菌根侵染率分别下降 22.42% 与 39.54%。P 添加与 AMF 的交互作用显著改变草木樨状黄芪菌根侵染率 (图 5B, AMF $\times$ P: $P < 0.05$); 不加 P 处理下, 添加苯菌灵显著抑制草木樨状黄芪菌根侵染率; 加 P 处理下, 添加苯菌灵对草木樨状黄芪菌根侵染率无显著影响 (图 5B)。

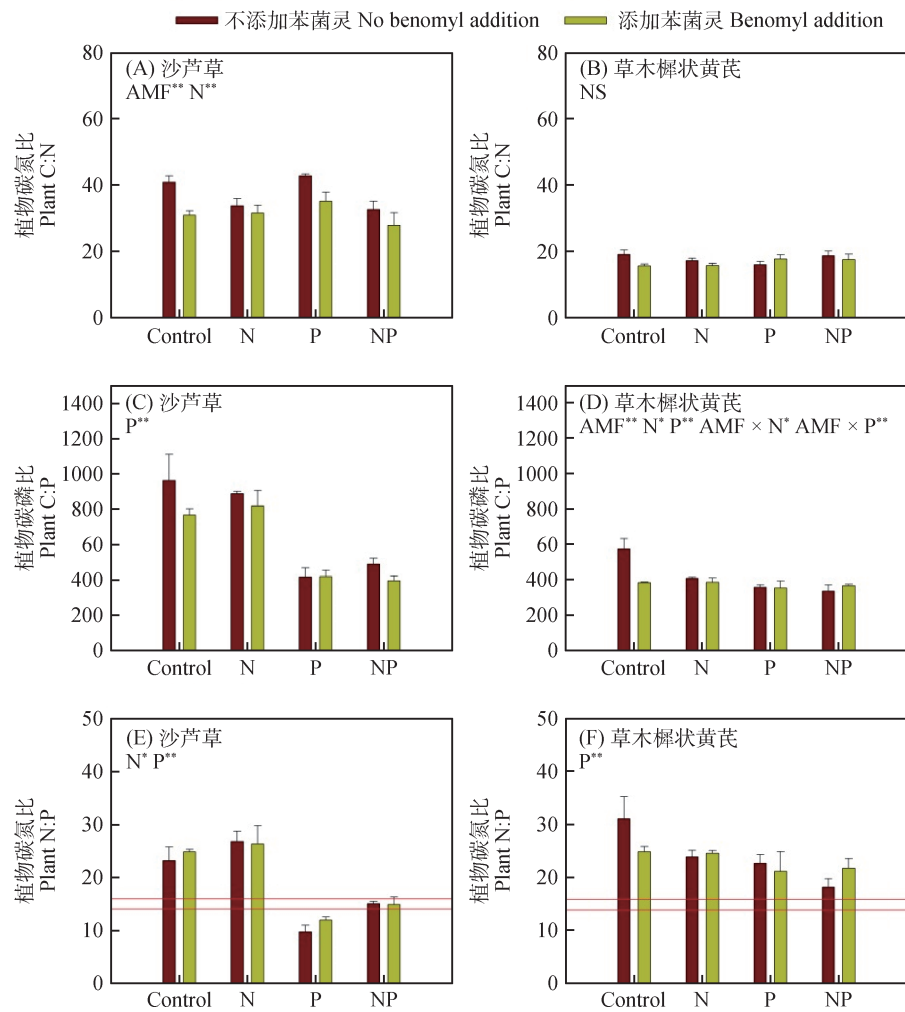


图 3 氮磷添加与 AMF 对沙芦草和草木樨状黄芪 C:N:P 化学计量比的影响

Fig. 3 Effects of N and P additions and AMF on the C:N:P ratios of *A. mongolicum* and *A. melilotoides*

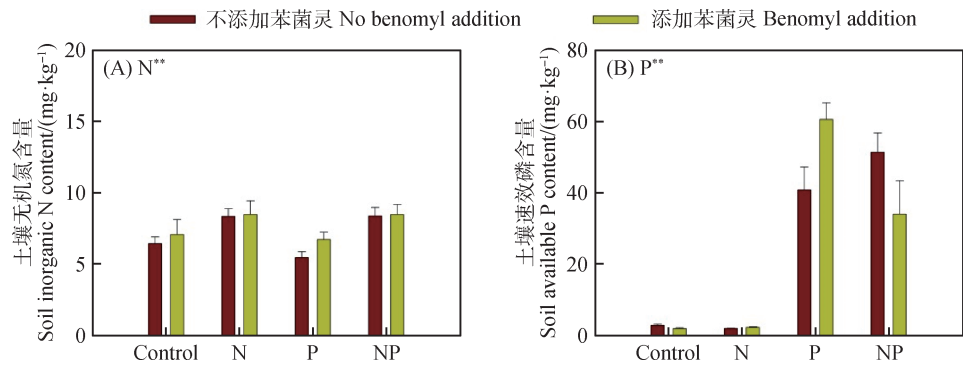


图 4 氮磷添加与 AMF 对土壤无机氮与速效磷含量的影响

Fig. 4 Effects of N and P additions and AMF on soil inorganic N and available P contents

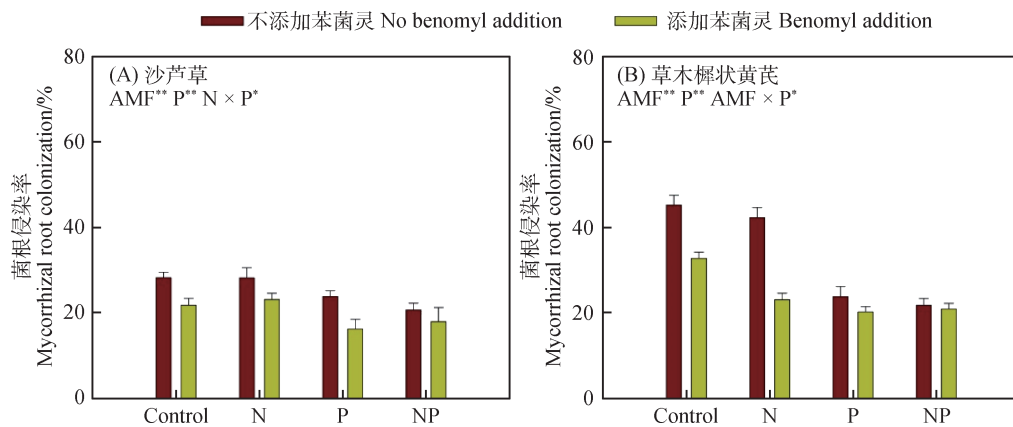


图 5 氮磷添加与 AMF 对沙芦草和草木樨状黄芪菌根侵染率的影响

Fig. 5 Effects of N and P additions and AMF on the mycorrhizal root colonization of *A. mongolicum* and *A. melilotoides*

3 讨论

3.1 N、P 添加与 AMF 对沙芦草和草木樨状黄芪地上生物量的影响

植物群落优势种对外界环境因子的响应与适应,是天然草原生态系统的关键过程之一^[18]。当前研究结果发现:AMF 与 P 添加的交互作用改变沙芦草地上生物量;土壤高 P 水平,AMF 强烈抑制沙芦草地上生物量。与当前研究结果一致,前期研究也发现 P 添加抑制 AMF 的侵染能力,进而造成其与宿主植物的关系由“互利共生”转变为“寄生”^[16-20]。已有研究指出,植物通过“根系途径”与“菌根途径”实现对土壤养分的吸收利用。加 P 处理下沙芦草菌根侵染率显著降低;沙芦草可能通过“根系途径”吸收养分,减少其对“菌根途径”的依赖^[13]。

草木樨状黄芪地上生物量对 N 添加存在负向响应,N 添加抑制草木樨状黄芪地上生物量。草木樨状黄芪能够与根瘤菌形成“共生关系”,N 添加可能引起草木樨状黄芪“氮阻遏”现象,进而抑制其生物量累积^[21]。草木樨状黄芪地上生物量对 P 添加的正向响应,表明草木樨状黄芪作为豆科喜 P 植物,适量的 P 素补充利于其地上生物量累积^[22]。苯菌灵添加对草木樨状黄芪地上生物量无显著影响,产生上述结果的原因可能是:草木樨状黄芪为“轴根型”深根系植物,苯菌灵添加可能只影响表层根系的 AMF 侵染程度,对深层根系的 AMF 影响较小。Guo 等^[22]的研究发现,连续 16 年的 P 添加处理对典型草原禾草、杂类草地上生物量无显著影响。本研究发现,P 添加对荒漠草原植物生长存在促进作用。以上结果不一致的原因可能是植物对 P 添加的响应存在环境依赖性,草原生态系统类型的差别可能是影响 P 肥肥效的重要因素^[21]。

3.2 N、P 添加与 AMF 对沙芦草和草木樨状黄芪养分含量与化学计量比的影响

植物化学计量比是表征天然草原植物养分利用策略的关键指标之一^[23]。AMF 通过降低沙芦草地上植株的 N 含量,进而增加其 C:N。以上结果表明:AMF 可能与沙芦草存在 N 素竞争。与我们的研究结果一致,前期报道也发现,在 N 限制的草原生态系统中植物与 AMF 存在“N 竞争”^[24]。P 添加使 0~10 cm 表层土壤速效 P 含量由 $2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加到 $40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。P 添加降低沙芦草与草木樨状黄芪 C:P 与 N:P,是通过显著增加其 P 含量。然而,与草木樨状黄芪相比,P 添加对沙芦草 N:P 的抑制作用更强。产生以上结果的原因可能是 P 添加提高土壤速效 P 含量集中在表层土壤;与草木樨状黄芪(深根型豆科植物)相比,沙芦草是浅根型丛生禾草,可能更能吸收利用表层土壤 P 元素^[25]。

前人研究发现:植物 $\text{N:P} > 16$,植物存在 P 限制;植物 $\text{N:P} < 14$,植物存在 N 限制^[26]。本研究发现,单独 P 添加使沙芦草降低到 < 14 ,使其由“N 限制”转变为“P 限制”。然而,单独 P 添加未使草木樨状黄芪元素限制类型发生转变。P 肥添加剂量与植物种间差异性可能是产生以上结果的潜在原因^[22]。

4 结论

N、P 养分添加能够提高宁夏东部温性荒漠草原优势植物沙芦草与草木樨状黄芪地上生物量。P 添加与 AMF 对沙芦草地上生物量存在“拮抗效应”。P 添加通过提高沙芦草与草木樨状黄芪 P 含量,降低其 C:P 与 N:P,缓解两种优势植物的 P 限制。施肥与 AMF 的交互作用显著影响荒漠草原优

势植物的生物量累积与养分吸收。未来草地施肥管理实践中,应着重考虑草原植物-AMF共生关系对N、P养分添加的响应过程。

参考文献

- [1] DU E Z, TERRER C, PELLEGRINI A F A, et al. Global patterns of terrestrial nitrogen and phosphorus limitation [J]. *Nature Geoscience*, 2020, 13(3): 221-226
- [2] LI W B, GAN X L, JIANG Y, et al. Nitrogen effects on grassland biomass production and biodiversity are stronger than those of phosphorus [J]. *Environmental Pollution*, 2022, 309: 119720
- [3] 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
- [4] SEABLOOM E W, BORER E T, TILMAN D. Grassland ecosystem recovery after soil disturbance depends on nutrient supply rate [J]. *Ecology Letters*, 2020, 23(12): 1756-1765
- [5] SHI L N, LIN Z R, WEI X T, et al. Precipitation increase counteracts warming effects on plant and soil C:N:P stoichiometry in an alpine meadow [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 1044173
- [6] SUN Y, WANG C T, CHEN X L, et al. Phosphorus additions imbalance terrestrial ecosystem C: N: P stoichiometry [J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(24): 7353-7365
- [7] ELSER J J, STERNER R W, GOROKHOVA E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems [J]. *Ecology Letters*, 2000, 3(6): 540-550
- [8] STERNER R W, ELSER J J. *Ecological stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere* [M]. Princeton: Princeton University Press, 2002: 11-19
- [9] HAN W X, FANG J Y, GUO D L, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China [J]. *New Phytologist*, 2005, 168(2): 377-385
- [10] ZHAN S X, WANG Y, ZHU Z C, et al. Nitrogen enrichment alters plant N:P stoichiometry and intensifies phosphorus limitation in a steppe ecosystem [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2017, 134: 21-32
- [11] CAMENZIND T, PHILIPP GRENZ K, LEHMANN J, et al. Soil fungal mycelia have unexpectedly flexible stoichiometric C: N and C: P ratios [J]. *Ecology Letters*, 2021, 24(2): 208-218
- [12] HE S B, LONG M X, HE X Q, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi and water availability affect biomass and C: N: P ecological stoichiometry in alfalfa (*Medicago sativa* L.) during regrowth [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2017, 39(9): 199
- [13] BENNETT A E, GROTEN K. The costs and benefits of plant-arbuscular mycorrhizal fungal interactions [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2022, 73: 649-672
- [14] KIERS E T, DUHAMEL M, BEESETTY Y, et al. Reciprocal rewards stabilize cooperation in the mycorrhizal symbiosis [J]. *Science*, 2011, 333(6044): 880-882
- [15] ZHANG S J, LEHMANN A, ZHENG W S, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi increase grain yields: a meta-analysis [J]. *New Phytologist*, 2019, 222(1): 543-555
- [16] GRMAN E, ROBINSON T M P. Resource availability and imbalance affect plant-mycorrhizal interactions: a field test of three hypotheses [J]. *Ecology*, 2013, 94(1): 62-71
- [17] LIU Z H, LI M H, LIU J B, et al. Higher diversity and contribution of soil arbuscular mycorrhizal fungi at an optimal P-input level [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 337: 108053
- [18] YANG X, LIU Y, TIAN H Y, et al. Short-term nitrogen and phosphorus additions rather than mycorrhizal suppression determine plant community composition and productivity in desert steppe [J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 168: 104144
- [19] CUI H Y, SUN W, DELGADO-BAQUERIZO M, et al. Phosphorus addition regulates the responses of soil multifunctionality to nitrogen over-fertilization in a temperate grassland [J]. *Plant and Soil*, 2022, 473(1): 73-87
- [20] JOHNSON N C. Resource stoichiometry elucidates the structure and function of arbuscular mycorrhizas across scales [J]. *New Phytologist*, 2010, 185(3): 631-647
- [21] YANG G W, ROY J, VERESOGLOU S D, et al. Soil biodiversity enhances the persistence of legumes under climate change [J]. *New Phytologist*, 2021, 229(5): 2945-2956
- [22] GUO Y M, ZHOU M, SHENG J, et al. Aboveground net primary productivity was not limited by phosphorus in a temperate typical steppe in Inner Mongolia [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2023, 16(4): rtac085
- [23] 安 卓, 牛得草, 文海燕, 等. 氮素添加对黄土高原典型草原长芒草氮磷重吸收率及C:N:P化学计量特征的影响 [J]. *植物生态学报*, 2011, 35(8): 801-807
- AN Z, NIU D C, WEN H Y, et al. Effects of N addition on nutrient resorption efficiency and C: N: P stoichiometric characteristics in *Stipa bungeana* of steppe grasslands in the Loess Plateau, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(8): 801-807
- plant N: P ratios under warming and nitrogen addition in a temperate meadow ecosystem [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 686(1): 1129-1139
- [24] MEI L L, YANG X, ZHANG S Q, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate phosphorus limitation by reducing plant N: P ratios under warming and nitrogen addition in a temperate meadow ecosystem [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 686: 1129-1139
- [25] 丁 琴, 何 嘉, 郭文龙, 等. 添加氮磷与菌根抑制剂对荒漠草原草地净初级生产力的影响 [J]. *中国草地学报*, 2024, 46(4): 25-32
- DING Q, HE J, GUO W L, et al. Effects of nitrogen, phosphorus and fungicide additions on net primary productivity in desert steppe [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(4): 25-32
- [26] KOERSELMAN W, MEULEMAN A F M. The vegetation N: P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation [J]. *Journal of Applied Ecology*, 1996, 33(6): 1441