

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.05.006

引用格式:刘蕾,刘贵河,谭琦元.豆禾饲草多元素化学计量特征对混播的响应[J].草地学报,2026,34(5):1622—1631

LIU Lei, LIU Gui-he, TAN Qi-yi. Responses of Plant Multi-element Stoichiometric Characteristics of Leguminous and Gramineous Forages to Mixed Sowing[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(5):1622—1631

豆禾饲草多元素化学计量特征对混播的响应

刘蕾¹, 刘贵河², 谭琦元^{1*}

(1. 中国农业大学草业科学与技术学院, 北京 100193; 2. 河北北方学院, 河北 张家口 075000)

摘要:多元素化学计量耦合对植物生长至关重要。为探究坝上农牧交错区豆禾饲草混播对其多元素化学计量特征的影响,本研究以紫花苜蓿和无芒雀麦单播为对照,分析紫花苜蓿+无芒雀麦(MW)和紫花苜蓿+无芒雀麦+垂穗披碱草(MWP)两种混播组合对植物氮磷化学计量特征、大量元素(钾、钙、镁、硫)含量以及微量元素(铁、锰、铜、锌、镍)含量的影响。结果表明:紫花苜蓿和无芒雀麦单播处理的氮磷含量高于MW及MWP混播处理。紫花苜蓿的氮磷比在单播与MW及MWP混播处理之间无差异,但均大于16,表现为磷限制;无芒雀麦单播处理的氮磷比低于MW及MWP混播处理,表现为从氮限制转变为磷限制或氮磷共同限制。除无芒雀麦的锌含量之外,紫花苜蓿和无芒雀麦的大量及微量元素含量在单播与MW及MWP混播处理之间均无显著性差异。综上,坝上农牧交错区豆禾混播草地可能仍存在氮磷限制。

关键词:人工草地;混播草地;生态化学计量学;大量元素;微量元素

中图分类号:S812.2

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)05-1622-10

Responses of Plant Multi-element Stoichiometric Characteristics of Leguminous and Gramineous Forages to Mixed Sowing

LIU Lei¹, LIU Gui-he², TAN Qi-yi^{1*}

(1. College of Grassland Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Hebei North University, Zhangjiakou, Hebei Province 075000, China)

Abstract: Multi-element stoichiometric coupling is critical for plant growth. To investigate the effects of mixed cultivation of leguminous and gramineous forages on their multi-element stoichiometric characteristics in the Bashang agro-pastoral ecotone, this study used the monoculture of *Medicago sativa* and *Bromus inermis* as the control treatment and further analyzed the influences of two mixed sowing combinations, i. e., *M. sativa*+*B. inermis* (MW) and *M. sativa*+*B. inermis*+*Elymus nutans* (MWP), on plant nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics, macro-element (potassium, calcium, magnesium, sulfur) contents, and microelement (iron, manganese, copper, zinc, nickel) contents. The results showed that the nitrogen and phosphorus contents of *M. sativa* and *B. inermis* in the monoculture treatment were higher than those in the MW and MWP mixed sowing treatments. The ratio of nitrogen to phosphorus (N:P ratio) of *M. sativa* in the monoculture treatment showed no difference compared to those in the MW and MWP mixed sowing treatments (all exceed 16), indicating the phosphorus limitation of *M. sativa*. However, the N:P ratio of *B. inermis* in the monoculture treatment was lower than those in the MW and MWP mixed sowing treatments, indicating a shift from nitrogen limitation to phosphorus limitation or dual limitation of nitrogen and phosphorus of *B. inermis*. Except for the zinc content of *B. inermis*, no differences in the macroelement and microelement contents of *M. sativa* and *B. inermis* were observed between monoculture treatments and mixed sowing treatments. In conclusion, nitrogen and phosphorus limitations might still exist in the leguminous and gramineous mixed sowing grassland in the Bashang agro-pastoral ecotone.

收稿日期:2025-06-16;修回日期:2025-10-28

基金项目:国家自然科学基金项目(32301498);财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系(CARS-34)资助

作者简介:刘蕾(2000-),女,汉族,安徽铜陵人,硕士研究生,主要从事草地生态与管理方向研究,E-mail: 2661498893@qq.com;*通信

作者 Author for correspondence, E-mail: cautanqiqi133@cau.edu.cn

Key words: Artificial Grassland; Mixed sowing grassland; Ecological Stoichiometry; Macroelement; Microelement

坝上农牧交错区位于我国北方农牧交错区^[1],是我国华北地区重要的生态屏障,是维护京津地区生态安全,促进区域发展的重要生态资源涵养区^[2]。但近几十年来,由于工业和经济快速发展,草原开垦现象加剧,家畜数量快速增加以及全球气候变化等因素导致坝上农牧交错区草地严重退化,饲草料供给与家畜养殖严重失衡。建植人工草地不仅可以为家畜提供大量优质饲草,而且可以改善地力水平,对于坝上农牧交错区可持续发展具有重要意义^[3]。豆科饲草与禾本科饲草进行混播可以通过生态位差异充分利用水分和养分资源^[4],加快养分循环,具有较高的生产力和较为均衡的营养品质,是人工草地建植的优选方式^[5]。目前关于豆禾混播草地的研究主要集中在不同混播比例和混播组合对饲草的饲用品质和生产力的影响等方面,很少关注豆禾混播草地植物生态化学计量特征,特别是在坝上农牧交错区^[5-8]。例如,姚泽英等^[8]为研究坝上农牧交错区豆禾混播草地的建植效果,以紫花苜蓿、无芒雀麦与垂穗披碱草为研究对象,分析豆禾饲草混播对建植当年人工草地干草产量和饲用品质的影响。植物生态化学计量学主要研究植物器官内元素含量及比值等计量特征的变化^[9],这些特征能够反映植物对养分的吸收规律,并用于判断限制性元素^[10]。因此,对坝上农牧交错区豆禾混播草地植物生态化学计量特征进行研究具有重要意义。

氮和磷作为植物遗传物质和蛋白质的重要组成部分,对植物的光合作用和根系生长等生理功能具有重要作用^[11]。钾具有促成植物成长、代谢及加强抗病虫害和抗倒伏等功能^[11]。前人针对豆禾混播草地植物氮、磷和钾元素化学计量特征进行了研究^[12-15]。独双双等^[13]对黄土高原西部地区老芒麦与苜蓿间作草地植物化学计量特征进行了研究,他们发现随着禾草比例的增加,紫花苜蓿与老芒麦的氮含量基本呈现增加趋势,紫花苜蓿与老芒麦的磷含量基本呈现先增加后下降的变化趋势。除了氮、磷、钾之外,其他大量元素如钙、镁、硫等也在植物的生理功能中发挥重要作用^[11]。比如,钙在作物中调控细胞极性生长和细胞壁生物合成,对根毛发育、花粉管伸长等具有重要作用^[16]。镁是核糖体的重要成分,能促进作物体内维生素的形成^[17]。硫在植物体内的氧化还原反应中具有重要的调控作用,且作为阴离子可以调控植物体内pH^[18]。但目前关

于豆禾混播草地植物钙、镁、硫等大量元素化学计量特征的研究报道较少。微量元素如铁、锰、铜、锌、镍等在植物体内也发挥着重要作用,它们是植物器官生长发育、果实产量和品质形成的物质基础^[11]。比如铁在植物体内具有包括遗传物质的合成和修复,能量生成,信号转导,氧气运输,免疫防御,维生素及辅酶合成的重要功能^[19]。锰参与植物光合作用、叶绿素合成、维持细胞器正常结构、酶活化等生理过程^[20]。铜作为多种酶的固有成分之一,在植物新陈代谢过程中参与了氧的电子传递和氧化还原等多种反应途径^[21]。锌对于植物蛋白质合成、酶活性、DNA合成及细胞分裂等基本生理活动具有重要作用^[22]。镍参与植物多个生理生化反应以及维持细胞的氧化还原状态等^[23]。然而,关于豆禾混播草地植物微量元素化学计量特征的研究也较少。植物体需要包括氮、磷、钾、钙、镁、硫等大量元素和铁、锰、铜、锌、镍等微量元素在内的多元素来维持自身生长并实现完整的生命周期,植物多元素的化学计量耦合是维持生态系统功能的基础^[24]。因此,有必要研究豆禾饲草混播对植物多元素化学计量特征的影响。此外,坝上农牧交错区土壤为砂壤土,其粘粒含量相对较低,土壤养分保持能力相对较差;另一方面,该地区土壤偏碱性,可能会影响到铁、铜等元素的有效性,进而影响植物养分吸收^[25]。坝上农牧交错区土壤特性对豆禾混播草地植物多元素化学计量特征有何影响也需要进一步研究。

本研究以坝上农牧交错区豆禾混播草地为研究对象,分析紫花苜蓿(*Medicago sativa*)和无芒雀麦(*Bromus inermis*)在单播和混播时其植物大量元素(氮、磷、钾、钙、镁、硫)和微量元素(铁、锰、铜、锌、镍)化学计量变化特征,以期对坝上农牧交错区豆禾混播草地管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

豆禾混播草地位于张家口市国家牧草产业技术体系张家口综合试验站,地处41°10'N,114°00'E,平均海拔约为1400 m。属于温带大陆性季风气候,年平均气温2.5℃,年平均降雨量396 mm,且主要集中在7—9月,占全年降雨量的70%,无霜期110 d。土

壤为砂壤土,表层土壤有机质含量为 $25.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮含量为 $70.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷含量为 $6.33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量为 $125.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 值为 $8.03^{[8,26]}$ 。

1.2 试验设计

豆禾混播草地始建植于2019年,为探讨不同豆禾混播组合对植物元素化学计量特征的影响,本研究设置紫花苜蓿与无芒雀麦(MW)以及紫花苜蓿与无芒雀麦和垂穗披碱草(MWP)两种混播组合(垂穗披碱草是一种多年生冷季型禾本科饲草,抗寒性强,是我国北方地区人工草地建植常用禾本科饲草^[27]),上述饲草组合均以豆禾比3:7进行同行混播(坝上农牧交错区豆禾饲草混播研究结果显示:豆禾饲草以豆禾比3:7进行混播时,其干草产量最高且饲用品质显著提升^[7-8])。紫花苜蓿(M)和无芒雀麦(W)单播作为对照处理。紫花苜蓿单播量为 $18 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,无芒雀麦单播量为 $45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,垂穗披碱草单播量为 $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。小区样地面积为 $3 \text{ m} \times 5 \text{ m}$,播距为 30 cm ,每个处理3次重复。

1.3 采样方法

2022年于紫花苜蓿初花期进行刈割,在每个小区内布置3个 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 样方,留茬高度 5 cm ,豆禾混播草地一年刈割两次^[7]。将采集的植物样品带回实验室置于电热鼓风干燥箱(DHG-9240,上海一恒科学仪器有限公司)中,首先于 105°C 下杀青 30 min ,随后于 65°C 下烘干至恒重。烘干后的样品研磨粉碎后过筛,装入标记好的封口袋中保存待测。

1.4 测定指标及方法

植物氮含量采用凯式定氮法测定^[28]。植物磷含量采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮钼锑抗比色法测定^[29],植物氮磷比值基于氮含量和磷含量确定。关于植物大量元素含量(钾、钙、镁、硫)和植物微量元素含量(铁、锰、铜、锌、镍)的测定,首先用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 对植物样品进行消煮,定容至 50 ml ,摇匀后过滤,取 10 ml 滤液用电感耦合等离子发射光谱仪(ICP-AES)(Optima 5300DV)进行测定^[28]。

1.5 数据分析

采用Excel 2019和SPSS 26.0进行数据整理和

统计分析。采用单因素方差分析方法(One-way ANOVA)分析单播处理与混播处理以及不同混播组合处理之间紫花苜蓿和无芒雀麦的氮磷化学计量特征、大量元素含量、微量元素含量的差异。采用Pearson相关性分析方法对紫花苜蓿和无芒雀麦的氮、磷、钾、钙、镁、硫、铁、锰、铜、锌、镍元素含量之间的关系进行分析。

2 结果与分析

2.1 豆禾混播草地植物氮磷化学计量特征

紫花苜蓿和无芒雀麦单播处理的氮含量显著高于MW混播处理和MWP混播处理;紫花苜蓿和无芒雀麦单播处理的磷含量显著高于MW和MWP混播处理;紫花苜蓿的氮磷比值在单播处理、MW和MWP混播处理之间无显著性差异;无芒雀麦单播处理的氮磷比值低于MW、MWP混播处理。紫花苜蓿和无芒雀麦的氮含量、磷含量和氮磷比值在MW混播处理和MWP混播处理之间均无显著性差异(图1)。

在单播处理中,紫花苜蓿的氮含量和氮磷比值显著高于无芒雀麦,磷含量显著低于无芒雀麦。在MW混播处理中,紫花苜蓿的氮磷含量和氮磷比值与无芒雀麦相比无显著性差异。在MWP混播处理中,紫花苜蓿的氮磷含量显著高于无芒雀麦,但氮磷比值与无芒雀麦相比无显著性差异。

2.2 豆禾混播草地植物大量元素化学计量特征

紫花苜蓿单播处理的钾、钙、镁、硫含量与MW和MWP混播处理的相比均没有显著性差异,且MW混播处理的钾、钙、镁、硫含量和MWP混播处理相比也无显著性差异。无芒雀麦单播处理的钾、钙、镁、硫含量与MW和MWP混播处理相比均无显著性差异,且其钾、钙、镁、硫含量在不同混播组合处理之间也没有显著性差异(图2)。

在单播处理中,紫花苜蓿的钙、镁、硫含量显著高于无芒雀麦,钾含量与无芒雀麦相比无显著性差异。在MW混播处理中,紫花苜蓿的钙、镁含量显著高于无芒雀麦,钾含量显著低于无芒雀麦,硫含量与无芒雀麦相比无显著性差异。在MWP混播处理中,紫花苜蓿的钙含量显著高于无芒雀麦,但钾、镁、硫含量与无芒雀麦相比无显著性差异。

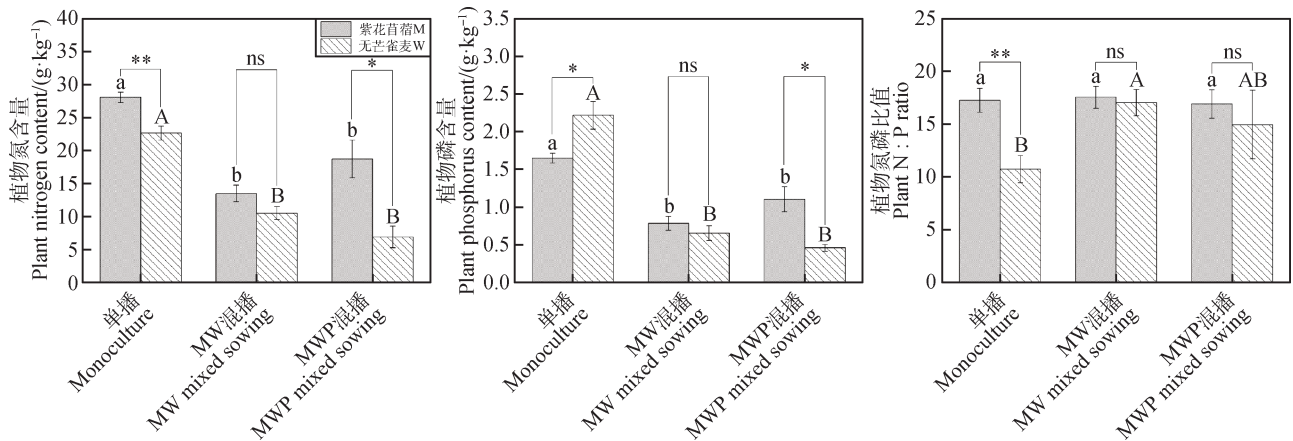


图1 单播和混播对植物氮磷化学计量特征的影响

Fig. 1 Effects of monoculture and mixed sowing on plant nitrogen and phosphorus stoichiometry

注:不同小写字母表示紫花苜蓿氮磷化学计量特征在不同建植方式之间差异显著($P < 0.05$)。不同大写字母表示无芒雀麦氮磷化学计量特征在不同建植方式之间差异显著($P < 0.05$)。同一处理下紫花苜蓿与无芒雀麦的氮磷化学计量特征的差异比较用以下符号表示,ns: $P > 0.05$;*, $P < 0.05$;**, $P < 0.01$;***, $P < 0.001$,下同

Note: Different lowercase letters indicate the significant difference of nitrogen and phosphorus stoichiometry of *Medicago sativa* across different planting methods ($P < 0.05$). Different capital letters indicate the significant difference of nitrogen and phosphorus stoichiometry of *Bromus inermis* across different planting methods ($P < 0.05$). The comparison of the difference of nitrogen and phosphorus stoichiometry between *Medicago sativa* and *Bromus inermis* under the same treatment was expressed by the following symbols, ns, $P > 0.05$; *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$; ***, $P < 0.001$; the same as below

2.3 豆禾混播草地植物微量元素化学计量特征

紫花苜蓿单播处理的铁、锰、铜、锌、镍含量与MW和MWP混播处理相比均无显著性差异,其铁、锰、铜、锌、镍含量在不同混播组合处理之间均也没有显著性差异。无芒雀麦单播处理的铁、锰、铜、镍含量与MW和MWP混播处理相比均没有显著性差异,但其单播处理的锌含量显著低于MW和MWP混播处理;无芒雀麦的铁、锰、铜、锌、镍含量在不同混播组合处理之间均没有显著性差异(图3)。

在单播处理中,紫花苜蓿的铁、锰、铜、镍含量与无芒雀麦相比无显著性差异,其锌含量显著高于无芒雀麦。在MW混播处理中,紫花苜蓿的铁、铜、锌、镍含量与无芒雀麦相比无显著性差异,其锰含量显著低于无芒雀麦。在MWP混播处理中,紫花苜蓿的锰含量显著低于无芒雀麦,其铁、铜、锌、镍含量与无芒雀麦相比无显著性差异。

2.4 豆禾混播草地植物元素化学计量特征相关性分析

紫花苜蓿氮含量与其磷含量显著正相关($r = 0.94$),与其镍含量显著负相关($r = -0.71$);紫花苜蓿磷含量与其镍含量显著负相关($r = -0.61$);紫花苜蓿

钾含量与其硫含量显著负相关($r = -0.66$);紫花苜蓿钙含量与其镁含量显著正相关($r = 0.63$);紫花苜蓿镁含量与其硫含量和锰含量显著正相关($r = 0.58$; $r = 0.58$),与其铁含量显著负相关($r = -0.67$);紫花苜蓿硫含量与其铁含量显著负相关($r = -0.76$)。除上述相关关系以外,紫花苜蓿其它元素之间的相关性不显著(表1)。因此,紫花苜蓿的氮磷吸收、钙镁吸收、镁硫吸收和镁锰吸收存在协同效应。

无芒雀麦的氮含量与其磷含量显著正相关($r = 0.84$),与其锌含量显著负相关($r = -0.77$);无芒雀麦的磷含量与其硫含量和锌含量显著负相关($r = -0.63$; $r = -0.77$);无芒雀麦的钾含量与其钙含量、镁含量、硫含量、锰含量和镍含量显著负相关($r = -0.83$; $r = -0.79$; $r = -0.74$; $r = -0.63$; $r = -0.62$);无芒雀麦的钙含量与其镁含量、硫含量和锰含量显著正相关($r = 0.94$; $r = 0.79$; $r = 0.63$);无芒雀麦的镁含量与其硫含量和锰含量显著正相关($r = 0.68$; $r = 0.74$);无芒雀麦的硫含量与其镍含量显著正相关($r = 0.67$)。除上述相关关系以外,无芒雀麦其它元素之间的相关性不显著(表2)。上述结果可能表明:无芒雀麦的氮磷吸收、钙镁吸收、钙硫吸收、钙锰吸收、镁硫吸收、镁锰吸收和硫镍吸收存在协同效应。

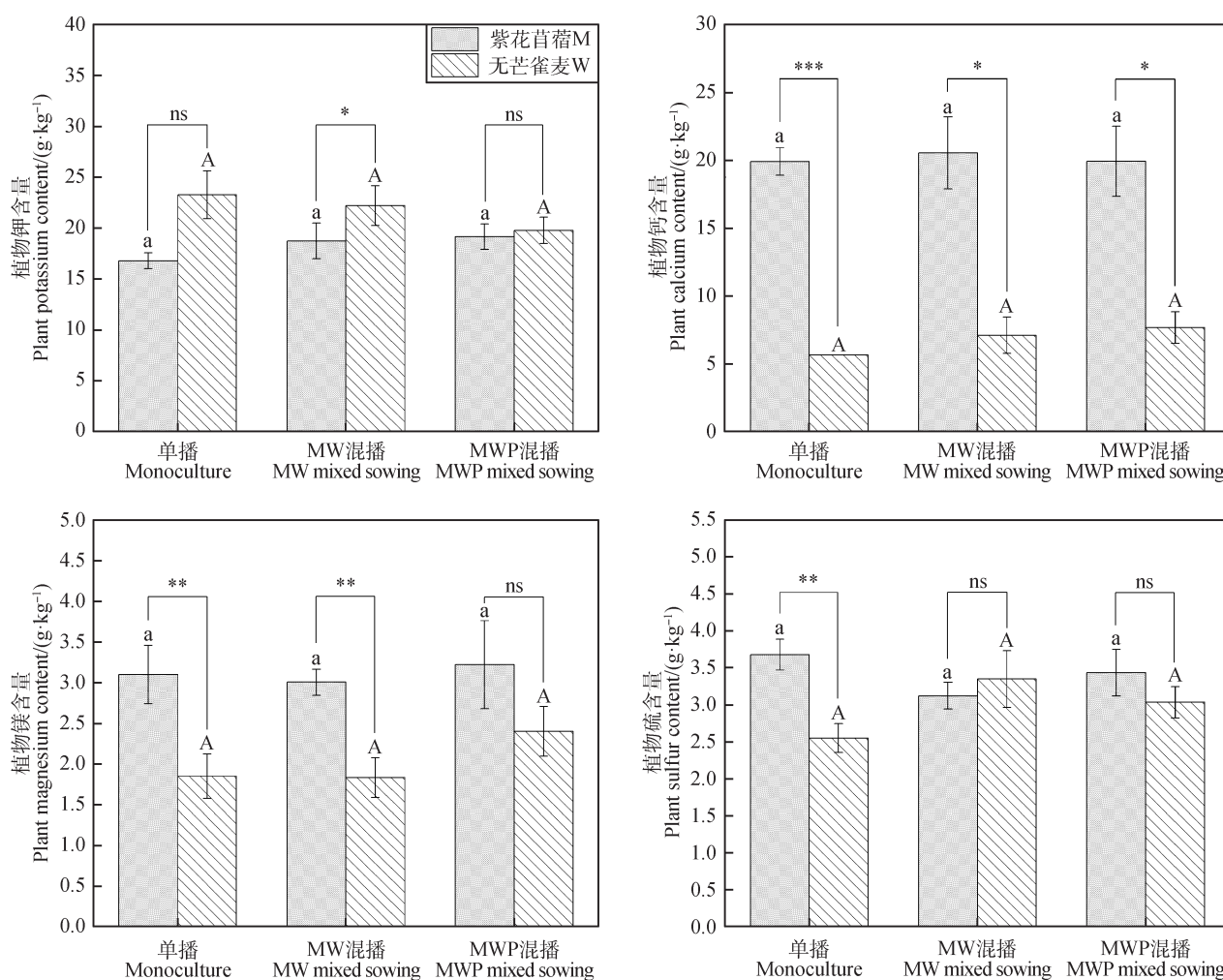


图2 单播和混播对植物大量元素含量的影响

Fig. 2 Effects of monoculture and mixed sowing on plant macronutrient contents

3 讨论

3.1 豆禾混播对植物氮磷化学计量特征的影响

氮磷元素是植物生长最主要的限制性元素,植物氮磷含量能够影响其生长状况和生物量^[11]。紫花苜蓿和无芒雀麦单播处理的氮磷含量均显著高于混播处理,但紫花苜蓿和无芒雀麦的氮磷含量在不同混播组合处理之间无显著性差异。而芦奕晓等^[29]对陇东黄土高原紫花苜蓿与无芒雀麦混播草地的研究发现紫花苜蓿和无芒雀麦混播处理的氮磷含量均显著高于其单播处理。这可能是因为陇东黄土高原地区年平均降水量为543 mm,高于本研究区域的年平均降水量(396 mm),并且本研究采样区域当年受春旱影响,降水减少,局部地区出现间断性干旱,这进一步加剧了其水分限制状况^[30]。与此同时,本研究区域土壤背景养分含量较低(土壤速效磷含量为6.33 mg·kg⁻¹),这可能导致在混

播条件下,豆禾饲草对土壤养分的竞争对其氮磷含量产生负面影响。因此,本研究中紫花苜蓿和无芒雀麦单播处理的氮磷含量均高于其混播处理,可能是由于干旱加剧了豆禾饲草混播对水资源的竞争以及相对较低的土壤背景养分导致豆禾饲草混播对土壤养分吸收的竞争加剧^[31-33]。此外,紫花苜蓿氮含量在单播处理中高于无芒雀麦,但其磷含量在单播处理中低于无芒雀麦(图1)。这可能是因为紫花苜蓿为豆科饲草,能够进行生物固氮,满足自身氮素需求,故其氮含量高于无芒雀麦;而无芒雀麦为禾本科饲草,具有发达的根系和较高的磷利用效率,故其磷含量高于紫花苜蓿^[34-35]。

植物氮磷比值可以反映植物生长过程中氮磷元素的限制状况^[36]。当植物氮磷比值小于14时,植物生长倾向于受到氮限制;当植物氮磷比值大于16时,植物生长倾向于受到磷限制;当植物氮磷比值处于14~16之间时,植物生长可能会受到氮磷共同

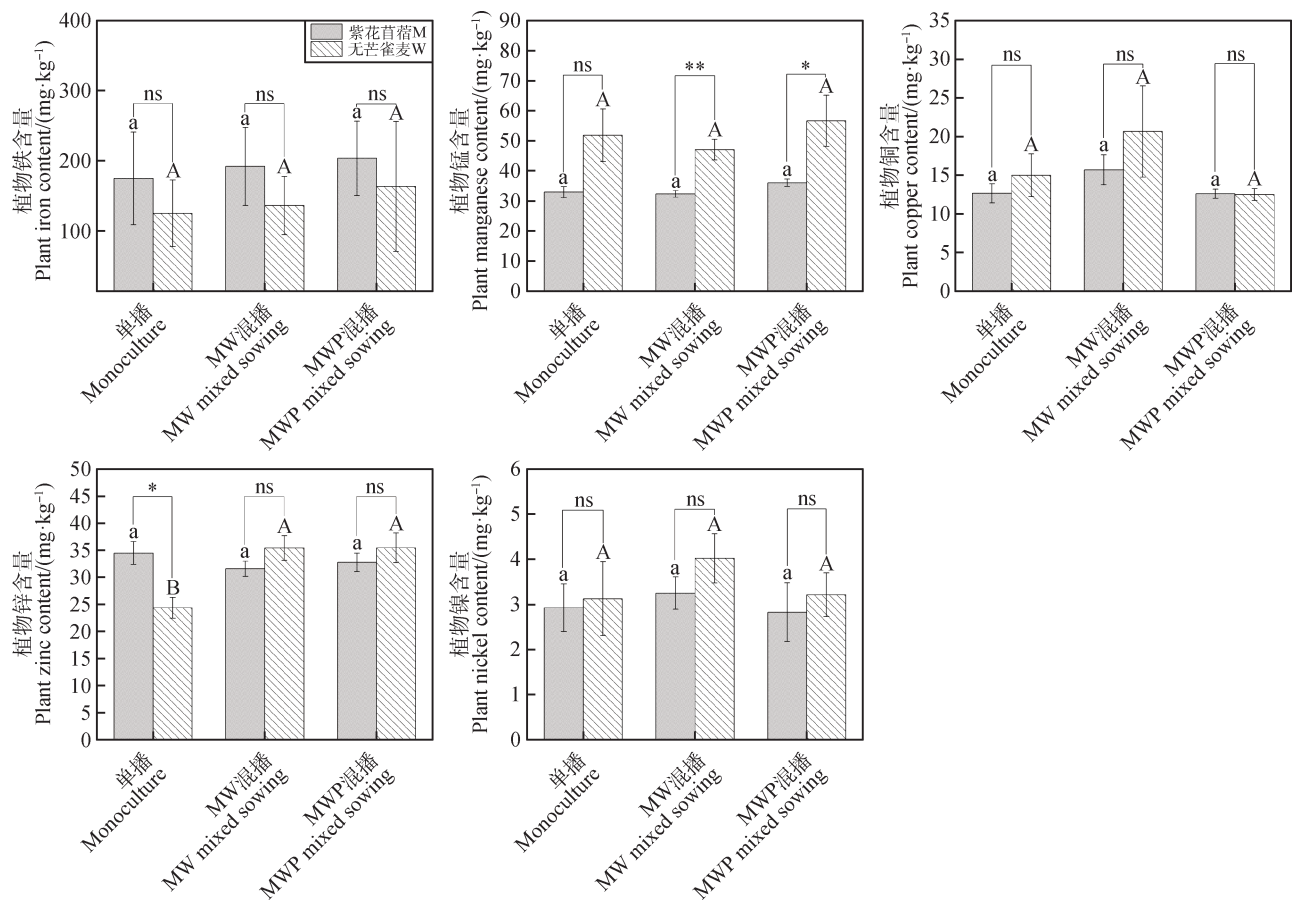


图 3 单播和混播对植物微量元素含量的影响

Fig. 3 Effects of monoculture and mixed sowing on plant micronutrient contents

表 1 紫花苜蓿各元素含量之间的关系

Table. 1 Correlations of element contents of *Medicago sativa*

相关性分析 Correlation analysis											
	氮 N	磷 P	钾 K	钙 Ca	镁 Mg	硫 S	铁 Fe	锰 Mn	铜 Cu	锌 Zn	镍 Ni
氮 N		0.94***	-0.43	-0.16	0.02	0.17	-0.04	-0.23	-0.38	0.13	-0.71**
磷 P	0.94***		-0.47	-0.36	-0.19	0.18	0.05	-0.41	-0.47	0.00	-0.61*
钾 K	-0.43	-0.47		-0.02	-0.40	-0.66*	0.30	-0.08	0.45	-0.20	0.25
钙 Ca	-0.16	-0.36	-0.02		0.63*	0.35	-0.25	0.34	0.15	0.20	0.09
镁 Mg	-0.02	-0.19	-0.40	0.63*		0.58*	-0.67**	0.58*	0.29	0.49	0.15
硫 S	0.17	0.18	-0.66*	0.35	0.58*		-0.76**	0.25	-0.21	0.39	-0.17
铁 Fe	-0.04	0.05	0.30	-0.25	-0.67**	-0.76**		-0.46	-0.30	-0.45	0.06
锰 Mn	-0.23	-0.41	-0.08	0.34	0.58*	0.25	-0.46		-0.04	0.40	0.20
铜 Cu	-0.38	-0.47	0.45	0.15	0.29	-0.21	-0.30	-0.04		0.07	0.33
锌 Zn	0.13	0.00	-0.20	0.20	0.49	0.39	-0.45	0.40	0.07		-0.13
镍 Ni	-0.71**	-0.61*	0.25	0.09	0.15	-0.17	0.06	0.20	0.33	-0.13	

注:*, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$; ***, $P < 0.001$; 氮, N; 磷, P; 钾, K; 钙, Ca; 镁, Mg; 硫, S; 铁, Fe; 锰, Mn; 铜, Cu; 锌, Zn; 镍, Ni。下同

Note, *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$; ***, $P < 0.001$; nitrogen, N; phosphorus, P; potassium, K; calcium, Ca; magnesium, Mg; sulfur, S; iron, Fe; manganese, Mn; copper, Cu; zinc, Zn; nickel, Ni. The same as below

限制或不受氮磷限制^[37]。本研究发现紫花苜蓿的氮磷比值在单播处理、MW 混播处理和 MWP 混播处理之间没有显著性差异,且均大于 16,表现为磷限制(图 1),这说明紫花苜蓿与无芒雀麦混播对于缓解紫花苜蓿磷限制的作用较小。无芒雀麦的氮

磷比值在单播处理中小于 14,表现为氮限制;在 MW 混播处理中大于 16,表现为磷限制;在 MWP 混播处理中介于 14 到 16 之间,可能表现为氮和磷的共同限制(图 1)。因此,紫花苜蓿与无芒雀麦混播能够缓解无芒雀麦的氮限制,这可能与紫花苜蓿的

表 2 无芒雀麦各元素含量之间的关系
Table 2 Correlations of element contents of *Bromus inermis*

相关性分析 Correlation analysis											
	氮 N	磷 P	钾 K	钙 Ca	镁 Mg	硫 S	铁 Fe	锰 Mn	铜 Cu	锌 Zn	镍 Ni
氮 N		0.84***	0.18	-0.20	-0.15	-0.35	-0.19	0.23	-0.08	-0.77**	0.11
磷 P	0.84***		0.52	-0.41	-0.35	-0.63*	-0.23	-0.02	-0.16	-0.77**	-0.36
钾 K	0.18	0.52		-0.83***	-0.79**	-0.74**	-0.35	-0.63*	-0.31	-0.16	-0.62*
钙 Ca	-0.20	-0.41	-0.83***		0.94***	0.79**	0.25	0.63*	0.27	0.11	0.51
镁 Mg	-0.15	-0.35	-0.79**	0.94***		0.68*	0.41	0.74*	0.21	-0.05	0.48
硫 S	-0.35	-0.63*	-0.74**	0.79**	0.68*		0.24	0.36	0.39	0.45	0.67*
铁 Fe	-0.19	-0.23	-0.35	0.25	0.41	0.24		0.13	0.05	0.03	0.23
锰 Mn	0.23	-0.02	-0.63*	0.63*	0.74*	0.36	0.13		0.43	-0.45	0.54
铜 Cu	-0.08	-0.16	-0.31	0.27	0.21	0.39	0.05	0.43		0.03	0.41
锌 Zn	-0.77**	-0.77**	-0.16	0.11	-0.05	0.45	0.03	-0.45	-0.03		0.17
镍 Ni	0.11	-0.36	-0.62*	0.51	0.48	0.67*	0.23	0.54	0.41	0.17	

固氮作用部分补充了无芒雀麦的氮素需求有关,但紫花苜蓿与无芒雀麦混播也会造成无芒雀麦的磷限制,并且垂穗披碱草的引入可能会进一步加剧无芒雀麦的氮磷养分限制^[38]。综上,坝上农牧交错区豆禾混播草地中豆禾饲草的氮磷养分限制可能仍然存在,需要进一步结合氮磷肥料施用进行草地管理,以维持豆禾混播草地的稳定性。此外,考虑到本研究区域处于半干旱气候区,豆禾混播草地的氮磷限制是否受到干旱的影响也需要进一步的研究。

3.2 豆禾混播对植物大量元素化学计量特征的影响

钾、钙、镁、硫等大量元素是植物生长的必需元素^[11]。紫花苜蓿和无芒雀麦的钾、钙、镁、硫含量在单播处理与不同混播处理之间以及不同混播组合处理之间均无显著性差异(图2)。这表明紫花苜蓿与无芒雀麦混播对二者钾、钙、镁、硫元素的吸收均没有影响,这可能与上述元素在紫花苜蓿和无芒雀麦的生理功能中所起作用类似有关。因为钾、钙、镁、硫元素与氮、磷元素不同,其更多地参与植物细胞渗透调节,酶活化和结构组成等生理过程,它们的分配受环境的影响相对较低^[39-40]。此外,在单播处理和不同混播组合处理中,紫花苜蓿的钙、镁含量均高于无芒雀麦(图2)。造成上述现象的原因可能与这两种植物对钙、镁元素的生理需求存在差异有关。钙是细胞壁果胶质的组成元素,而紫花苜蓿是豆科植物,其细胞壁相对较厚,因此,紫花苜蓿需要大量钙元素构建细胞壁以维持细胞膜稳定性,同时根瘤菌侵染豆科根系及固氮酶活性调控均需要钙离子参与信号传递与酶活化^[38-41]。而无芒雀麦为

禾本科植物,以硅质化细胞壁为主,对钙需求较低^[11]。镁元素是叶绿素的核心组成元素,豆科植物叶片的叶绿素含量通常高于禾本科植物^[11],同时豆科植物的共生固氮过程需要大量三磷酸腺苷(ATP),镁元素是ATP酶活性的必须辅因子,导致豆科植物对镁元素的需求相对更大^[11,38],因此,紫花苜蓿的镁元素含量高于无芒雀麦。综上,坝上农牧交错区豆禾混播草地管理中可能不需要施用含钾、钙、镁、硫等大量元素的肥料。

3.3 豆禾混播对植物微量元素化学计量特征的影响

铁、锰、铜、锌、镍等微量元素在植物生长中发挥着重要作用^[11]。除了无芒雀麦的锌含量以外,紫花苜蓿与无芒雀麦的铁、锰、铜、锌、镍含量在单播处理与混播处理之间以及不同混播组合处理之间均无显著性差异(图3)。这表明豆禾饲草混播可能对紫花苜蓿和无芒雀麦的微量元素吸收没有影响。这可能是因为紫花苜蓿与无芒雀麦的微量元素含量远低于其氮、磷、钾等大量元素含量,较低水平的微量元素即可满足植物体自身生长发育所需,同时本研究区域土壤pH值为8.03,其对微量元素有效性的影响相对较小,因此,豆禾饲草混播并未导致其对微量元素的竞争^[38,42]。关于混播后无芒雀麦锌含量增加的现象,这可能是因为豆禾饲草混播后,紫花苜蓿根瘤菌分泌的有机酸通过酸化作用和螯合作用提高了土壤锌的有效性,促进了无芒雀麦的锌吸收^[43]。未来需要进一步结合根瘤菌鉴定对上述机制进行论证。此外,单播处理和混播处理中紫花苜蓿的铁含量均高于其它微量元素含量(图3),

这与李满红等^[44]对甘肃陇东地区苜蓿草地元素含量变化特征研究的结果类似,他们发现紫花苜蓿的铁含量高于铜、锰、锌等微量元素含量。这说明紫花苜蓿对铁元素的需求相对较大,因此,坝上农牧交错区豆禾混播草地管理中可能不需要施用含锰、铜、锌、镍等微量元素的肥料,但对于较长建植年限的豆禾混播草地而言,需要关注其土壤铁元素的供应对紫花苜蓿生长发育的影响,必要时施用含铁元素的肥料。

3.4 混播草地植物养分特征之间的联系

紫花苜蓿和无芒雀麦的氮磷含量之间存在显著正相关关系,这与已有研究对丹麦哥本哈根的白三叶与黑麦草混播草地的植物氮磷变化研究的结果一致^[45]。豆禾饲草在氮磷吸收过程中存在协同效应,这可能是因为在豆科饲草与禾本科饲草混播系统中,豆科饲草通过固氮增加土壤氮的有效性,而禾本科饲草通过分泌磷酸酶和有机酸活化土壤磷,两者形成氮磷互补吸收机制^[46-47]。本研究发现紫花苜蓿和无芒雀麦的钙镁含量之间的正相关性,这表明豆禾饲草在钙镁吸收过程中存在协同效应。这可能是因为钙元素是细胞壁结构的关键成分,参与细胞信号传导和膜稳定性维持,镁元素是叶绿素的核心元素,同时也是多种酶的辅因子,植物在进行光合作用时需要大量镁元素支持^[11,38],而植物钙素吸收可能通过稳定叶绿体膜结构间接促进其对镁元素的利用,钙镁元素在植物代谢途径中的互补性可能导致两者之间的正相关性。紫花苜蓿和无芒雀麦的镁含量与其硫含量和锰含量呈显著正相关关系,上述关系可能是植物镁元素与硫、锰元素之间的协同作用所导致。镁元素作为ATP酶的辅因子,参与植物硫同化过程中的能量供应,同时植物硫代谢关键酶需要镁离子激活,因此两者在植物体内的含量常呈现协同积累^[38,48]。镁元素参与ATP的合成与分解,影响植物糖酵解和三羧酸循环中关键酶的活性,锰元素参与植物脂肪代谢和糖异生过程,两者在植物能量代谢链中的协同作用可能促进其协同积累;另外光系统Ⅱ中的锰簇(Mn_4CaO_5)和镁元素通过影响叶绿体膜结构共同维持植物光合作用,这也可能间接导致了植物镁锰元素的正相关性^[38,48-49]。此外,紫花苜蓿和无芒雀麦的钾硫含量之间存在负相关关系,这表明豆禾饲草的钾硫吸收可能存在拮抗效应。这可能是植物体内的离子

拮抗作用所导致,植物体内阳离子(如 K^+)含量过高会干扰细胞膜电位和功能,进而影响植物对阴离子(如 SO_4^{2-})的吸收效率^[50]。同时植物通过积累不同溶质维持自身细胞膜稳定性与调节渗透能力,高钾和高硫策略的调整也可能导致了植物体钾硫含量之间的负相关关系^[51-52]。

4 结论

豆禾饲草混播对其氮磷化学计量特征有显著影响。紫花苜蓿和无芒雀麦混播显著降低了其氮磷含量,紫花苜蓿的氮磷比在单播和混播处理中无差异,但均大于16,表现为磷限制,同时豆禾饲草混播显著提高了无芒雀麦的氮磷比,使得无芒雀麦从单播时的氮限制转变为混播时的磷限制或氮磷共同限制。除了无芒雀麦的锌含量之外,豆禾饲草混播对其大量元素和微量元素含量无影响。此外,豆禾饲草的氮磷吸收、钙镁吸收、镁硫吸收和镁锰吸收存在协同效应,但其钾硫吸收可能存在拮抗效应。综上,坝上农牧交错区豆禾混播草地可能仍存在氮磷限制。

参考文献

- [1] 蔡国柱. 张家口地区风沙侵蚀危害及防护林骨干工程的配置[J]. 林业资源管理,1987(2):59-62
CAI G Z. Hazards of wind-blown sand erosion in Zhangjiakou area and configuration of backbone projects of shelter forest[J]. Forest Resources Management,1987(2):59-62
- [2] 揭文辉,张策,汪冰,等. 2000—2018年坝上高原湿地遥感动态监测与生态环境变迁[J]. 矿产勘查,2020,11(12):2720-2728
JIE W H, ZHANG C, WANG B, et al. Remote sensing dynamic monitoring and ecological environmental changes of Bashang Plateau wetland from 2000 to 2018[J]. Mineral Exploration,2020,11(12):2720-2728
- [3] 古琛,贾志清,杜波波,等. 中国退化草地生态修复措施综述与展望[J]. 生态环境学报,2022,31(7):1465-1475
GU C, JIA Z Q, DU B B, et al. Reviews and prospects of ecological restoration measures for degraded grasslands of China[J]. Ecology and Environmental Sciences,2022,31(7):1465-1475
- [4] 杨春华,李向林,张新全,等. 扁穗牛鞭草+红三叶混播草地生物量及种间竞争的动态研究[J]. 四川农业大学学报,2006,24(1):32-36
YANG C H, LI X L, ZHANG X Q, et al. The dynamical studies on biomass and interspecific competition of limpoglass and red clover mixture[J]. Journal of Sichuan Agricultural University,2006,24(1):32-36

- [5] 吴世文,南丽丽,陈孝善,等. 不同紫花苜蓿-禾草混播方式对干草产量及土壤养分的影响[J]. 草地学报,2025,33(3):975-983
WU S W, NAN L L, CHEN X S, et al. Effects of different alfalfa-grass mixed sowing methods on hay yield and soil nutrients[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(3):975-983
- [6] 许莹月,侯钰荣,王静,等. 豆禾间行混播对草地生产性能与土壤养分的影响[J]. 中国草地学报,2024,46(10):75-86
XU Y Y, HOU Y R, WANG J, et al. Effects of intercropping mixture of legume and grass on grassland production performance and soil nutrients[J]. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(10):75-86
- [7] 杜俊颖,李鑫洋,杨莉,等. 冀西北坝上地区豆禾混播草地建植第三年草地生产力变化研究[J]. 草地学报,2022,30(7):1855-1861
DU J Y, LI X Y, YANG L, et al. Study on the changes of grassland productivity in the third year of mixed sowing in Bashang area of northwest of Hebei[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(7):1855-1861
- [8] 姚泽英,李军,宋连昭,等. 张家口坝上地区豆-禾牧草混播效果研究[J]. 草地学报,2020,28(4):1076-1082
YAO Z Y, LI J, SOGN L Z, et al. Study on the leguminous-gramineous grass mixed sowing in Bashang area of Zhangjiakou[J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(4):1076-1082
- [9] 田地,严正兵,方精云. 植物化学计量学:一个方兴未艾的生态学研究方向[J]. 自然杂志,2018,40(4):235-241
TIAN D, YAN Z B, FANG J Y. Plant stoichiometry: a research frontier in ecology[J]. Chinese Journal of Nature, 2018, 40(4):235-241
- [10] ELSER J J. Ecological stoichiometry: from sea to lake to land[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2000, 15(10):393-394
- [11] 王忠. 植物生理学[M]. 北京:中国农业出版社,2012:15-20
WANG Z. Plant Physiology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2012:15-20
- [12] 张永亮,于铁峰,郝凤. 豆禾混播牧草碳氮磷钾生态化学计量特征对施肥与混播比例的响应[J]. 草地学报,2020,28(5):1386-1394
ZHANG Y L, YU T F, HAO F. Responses of stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in legume-grass mixture forages to fertilization and mixed sowing ratio[J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(5):1386-1394
- [13] 独双双,李霞,路欣,等. 老芒麦与苜蓿间作草地牧草-土壤化学计量特征[J]. 草业科学,2024,41(11):2664-2674
DU S S, LI X, LU X, et al. Effects of *Elymus sibiricus* and *Medicago sativa* intercropping on pasture soil C, N, and P stoichiometric characteristics[J]. Pratacultural Science, 2024, 41(11):2664-2674
- [14] 杨惠敏,王冬梅. 草-环境系统植物碳氮磷生态化学计量学及其对环境因子的响应研究进展[J]. 草业学报,2011,20(2):244-252
YANG H M, WANG D M. Advances in the study on ecological stoichiometry in grass-environment system and its response to environmental factors[J]. Acta Pratacultural Sinica, 2011, 20(2):244-252
- [15] 余淑凤,胡玉福,舒向阳,等. 川西北高寒沙地不同年限高山柳林下优势植物碳、氮、磷生态化学计量特征[J]. 草业学报,2018,27(4):123-130
SHE S F, HU Y F, SHU X Y, et al. Variation of C, N and P stoichiometry in dominant understory plants during stand development in *Salix cupularis* plantations in alpine grassland in Northwestern Sichuan, China[J]. Acta Pratacultural Sinica, 2018, 27(4):123-130
- [16] 陈德伟,汤寓涵,石文波,等. 钙调控植物生长发育的进展分析[J]. 分子植物育种,2019,17(11):3593-3601
CHEN D W, TANG Y H, SHI W B, et al. Progress in the regulation of calcium growth and development[J]. Molecular Plant Breeding, 2019, 17(11):3593-3601
- [17] 刘昭阳,李书悦,毛婧莹,等. 镁营养对大豆苗期生长及根系形态构型的影响[J]. 华南农业大学学报,2024,45(3):321-328
LIU Z Y, LI S Y, MAO J Y, et al. Effect of magnesium nutrition on growth and root system architecture traits of soybean seedlings[J]. Journal of South China Agricultural University, 2024, 45(3):321-328
- [18] 许振英. 十年来我国畜牧学科中微量元素研究[J]. 中国动物营养学报,1989,1(1):1-9
XU Z Y. Recent developments in trace element nutrition of farm animals in China[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 1989, 1(1):1-9
- [19] 孔雨昕,马喜波,王桂芹. 铁的生物学功能及其在鱼类中的应用研究进展[J]. 饲料工业,2024,45(8):56-63
KONG Y X, MA X B, WANG G Q. Research progress on biological function of iron and its application in fish[J]. Feed Industry, 2024, 45(8):56-63
- [20] 王佳惠,李旭光,张弛,等. 锰元素影响小麦生长发育、产量和品质的研究进展[J]. 麦类作物学报,2024,44(8):1074-1082
WANG J H, LI X G, ZHANG C, et al. Research progress on effects of manganese on wheat growth, yield and quality[J]. Journal of Triticeae Crops, 2024, 44(8):1074-1082
- [21] COHU C M, PILON M. Cell biology of copper//Cell biology of metals and nutrients[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010:55-74
- [22] GUPTA N, RAM H, KUMAR B. Mechanism of Zinc absorption in plants: uptake, transport, translocation and accumulation[J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2016, 15(1):89-109
- [23] 王丙烁,黄益宗,王农,等. 镍污染土壤修复技术研究进展[J]. 农业环境科学学报,2018,37(11):2392-2402
WANG B S, HUANG Y Z, WANG N, et al. Research progress on remediation technology of nickel contaminated soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(11):2392-2402
- [24] TIAN D S, REICH P B, CHEN H Y H, et al. Global changes alter plant multi-element stoichiometric coupling[J]. New Phytologist, 2019, 221(2):807-817
- [25] 贾文茹,李庆,李秀明,等. 2000—2018年河北坝上地区土壤风蚀模数变化[J]. 中国沙漠,2024,44(1):130-141

- JIA W R, LI Q, LI X M, et al. The spatial and temporal variation of soil wind erosion modulus in the Bashang region of Hebei Province from 2000 to 2018 [J]. *Journal of Desert Research*, 2024, 44(1): 130-141
- [26] 刘东霞, 刘辉, 孟帅, 等. 农牧交错区混播人工草地生产性能及杂草群落动态研究[J]. *草地学报*, 2023, 31(7): 2086-2095
- LIU D X, LIU H, MENG S, et al. Study on the productivity and weed community dynamics of mixed artificial grasslands in agro-pastoral area [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(7): 2086-2095
- [27] 刘彩婷, 毛丽萍, 阿依谢木, 等. 紫花苜蓿与垂穗披碱草混播比例对其抗寒生长生理特征的影响[J]. *草业学报*, 2022, 31(7): 133-143
- LIU C T, MAO L P, A Y, et al. Effects of alfalfa (*Medicago sativa*) proportion on growth and physiological characteristics of cold resistance in mixtures with *Elymus nutans* [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022, 31(7): 133-143
- [28] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-35
- BAO S D. Soil and Agricultural Chemical Analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 30-35
- [29] 芦奕晓, 杨惠敏. 陇东黄土高原混播草地牧草叶片N、P、K重吸收及生态化学计量特征[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2020, 56(3): 285-293
- LU Y X, YANG H M. Leaf N, P and K resorption and stoichiometry of forages in the legume-grass mixture in the Loess Plateau of east Gansu [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2020, 56(3): 285-293
- [30] 河北省气象局. 河北省2022年度气候公报[EB/OL]. http://he.cma.gov.cn/qxfw/qhfx/qhgb/202302/t20230206_5290490.html, 2023-01-01/2025-10-28
- [31] LAWLORD W. Carbon and nitrogen assimilation in relation to yield: mechanisms are the key to understanding production systems [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2002, 53(370): 773-787
- [32] WANG S, CALLAWAY R M. Plasticity in response to plant-plant interactions and water availability [J]. *Ecology*, 2021, 102(6): e03361
- [33] LIU B, XU W, NIU Y, et al. TaTCP6 is required for efficient and balanced utilization of nitrate and phosphorus in wheat [J]. *Nature Communications*, 2025, 16(1): 1683
- [34] SPRENT J I. Legume nodulation: a global perspective [M]. New York: John Wiley & Sons, 2009: 20-30
- [35] TRANNIN W S, URQUIAGA S, GUERRA G, et al. Interspecies competition and N transfer in a tropical grass-legume mixture [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, 32(6): 441-448
- [36] DE WIT C T, VAN DEN BERGH J P. Competition between herbage plants [J]. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 1965, 13(2): 212-221
- [37] 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
- [38] MARSCHNER H. Mineral nutrition of higher plants [M]. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 1995: 40-50
- [39] WHITE P J, BROADLEY M R. Calcium in plants [J]. *Annals of Botany*, 2003, 92(4): 487-511
- [40] UDVARDI M, POOLE P S. Transport and metabolism in legume-rhizobia symbioses [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2013, 64: 781-805
- [41] 来幸樑, 师尚礼, 吴芳, 等. 紫花苜蓿与3种多年生禾草混播草地的土壤养分特征[J]. *草业科学*, 2020, 37(1): 52-64
- LAI X L, SHI S L, WU F, et al. Nutrient characteristics of soil sowed with different combinations of alfalfa and three perennial grasses [J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(1): 52-64
- [42] PALMER C M, GUERINOT M L. Facing the challenges of Cu, Fe and Zn homeostasis in plants [J]. *Nature Chemical Biology*, 2009, 5(5): 333-340
- [43] 刘忆, 袁玲. 根瘤菌和AM真菌对紫花苜蓿结瘤和产质量的影响[J]. *土壤学报*, 2020, 57(5): 1292-1298
- LIU Y, YUAN L. Effects of rhizobia and arbuscular mycorrhizal fungi on nodulation, yield and quality of *Medicago sativa* [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(5): 1292-1298
- [44] 李满红, 师尚礼, 张英俊, 等. 甘肃陇东地区紫花苜蓿草地土-草矿质养分含量及其相关性[J]. *草原与草坪*, 2018, 38(3): 79-84
- LI M H, SHI S L, ZHANG Y J, et al. The mineral nutrient content of soil and grass and their relevance in alfalfa pasture in eastern Gansu Province [J]. *Grassland and Turf*, 2018, 38(3): 79-84
- [45] HØGH-JENSEN H, SCHJØERRING J K. Interactions between nitrogen, phosphorus and potassium determine growth and N₂-fixation in white clover and ryegrass leys [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2010, 87(3): 327-338
- [46] TANG J, LI W, WEI T, et al. Patterns and mechanisms of legume responses to nitrogen enrichment: a global meta-analysis [J]. *Plants*, 2024, 13(22): 3244
- [47] LAMBERS H, SHANE M W, CRAMER M D, et al. Root structure and functioning for efficient acquisition of phosphorus: matching morphological and physiological traits [J]. *Annals of Botany*, 2006, 98(4): 693-713
- [48] ROMANI A M P. Cellular magnesium homeostasis [J]. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 2011, 512(1): 1-23
- [49] BARBER J. Photosynthetic energy conversion: natural and artificial [J]. *Chemical Society Reviews*, 2009, 38(1): 185-196
- [50] BARBER S A. Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach [M]. New York: Wiley, 1984: 20-30
- [51] WANG M, ZHENG Q S, SHEN Q R, et al. The critical role of potassium in plant stress response [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2013, 14(4): 7370-7390
- [52] SHABALA S, POTTOSIN I. Regulation of potassium transport in plants under hostile conditions: implications for abiotic and biotic stress tolerance [J]. *Physiologia Plantarum*, 2014, 151(3): 257-279