

成蓉蓉, 王海南, 额尔德木图, 等. 黄土高原区紫花苜蓿叶片生态化学计量特征对氮、磷添加的响应[J]. 山西农业科学, 2026, 54(1): 114-122.

CHENG R R, WANG H N, EER D, et al. Response of ecological stoichiometric characteristics of alfalfa leaves to nitrogen and phosphorus additions in the loess plateau[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2026, 54(1): 114-122.

doi:10.26942/j.cnki.issn.1002-2481.2026.01.13

## 黄土高原区紫花苜蓿叶片生态化学计量特征 对氮、磷添加的响应

成蓉蓉<sup>1,2</sup>, 王海南<sup>1,2</sup>, 额尔德木图<sup>1,2</sup>, 王佳丽<sup>1,2</sup>, 张晓琳<sup>1,2,3</sup>, 翟鹏辉<sup>1,2</sup>

(1. 山西农业大学 草业学院, 山西 晋中 030801; 2. 草地生态保护与乡土草种质创新山西省重点实验室, 山西 晋中 030801;

3. 农业农村部饲草高效生产模式创新重点实验室, 山西 晋中 030801)

**摘要:** 紫花苜蓿是黄土高原地区主要的多年生豆科牧草, 其叶片生态化学计量特征可指示植物对环境变化的响应。为探究紫花苜蓿叶片生态化学计量特征对氮、磷添加的响应, 于2022—2023年在山西农业大学草业学院试验站开展试验, 采用随机区组设计, 设置0(N0)、5(N5)、10(N10)、15(N15)、20(N20) g/m<sup>2</sup>共5个氮添加处理, 0(P0)、10(P10) g/m<sup>2</sup>共2个磷添加处理, 测定总生物量、土壤铵态氮、硝态氮、速效磷含量及紫花苜蓿叶片碳、氮、磷含量。结果表明, 在种植第1年, 氮添加提高了叶片氮含量, 但对叶片碳、磷含量没有显著影响, 导致叶片碳氮比下降; 磷添加显著提高了叶片磷含量, 使土壤速效磷含量显著提高了132.82%, 降低了叶片碳氮比、碳磷比和氮磷比; 种植第2年, 氮添加使土壤硝态氮含量显著降低了8.71%, 但对叶片碳、氮、磷含量无显著影响; 磷添加使土壤速效磷含量显著提高了268.64%, 显著提高了叶片氮、磷含量, 降低了叶片碳氮比、碳磷比和氮磷比。综上, 氮添加对紫花苜蓿叶片生态化学计量特征的影响主要发生在种植初期, 最佳施氮量为15 g/m<sup>2</sup>, 叶片生态化学计量特征对不同养分添加的响应存在差异。

**关键词:** 氮添加; 磷添加; 紫花苜蓿; 生态化学计量特征; 碳氮比; 碳磷比; 氮磷比

**中图分类号:** S541+.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-2481(2026)01-0114-09

### Response of Ecological Stoichiometric Characteristics of Alfalfa Leaves to Nitrogen and Phosphorus Additions in the Loess Plateau

CHENG Rongrong<sup>1,2</sup>, WANG Hainan<sup>1,2</sup>, EER Demutu<sup>1,2</sup>, WANG Jiali<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Xiaolin<sup>1,2,3</sup>, ZHAI Penghui<sup>1,2</sup>

(1. College of Grassland Science, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China; 2. Shanxi Key Laboratory of Grassland Ecological Protection and Native Grass Germplasm Innovation, Jinzhong 030801, China; 3. Key Laboratory of Innovation of Efficient Forage Production Mode of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Jinzhong 030801, China)

**Abstract:** Alfalfa (*Medicago sativa* L.) is a key perennial leguminous forage in the Loess Plateau, and its leaf ecological stoichiometric characteristics can indicate plant responses to environmental changes. In order to investigate the response of ecological stoichiometry characteristics of alfalfa leaves to nitrogen and phosphorus additions, in this study, experiments were conducted at the experimental station of the College of Grassland Science, Shanxi Agricultural University from 2022 to 2023, a randomized block design was used with five nitrogen addition treatments: 0(N0), 5(N5), 10(N10), 15(N15), and 20(N20) g/m<sup>2</sup>, and two phosphorus addition treatments: 0(P0) and 10(P10) g/m<sup>2</sup>. Total biomass, leaf carbon(C), nitrogen(N), and phosphorus(P) contents, as well as soil ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, and available phosphorus contents were

收稿日期: 2025-03-24

基金项目: 山西省研究生实践创新项目(2023SJ102); 山西省基础研究计划(202303021221092); 国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点项目(U22A20576)

作者简介: 成蓉蓉, 在读硕士, 研究方向: 草地生态系统生态学, E-mail: crr1218@126.com

通信作者: 张晓琳, 副教授, 博士, 主要从事草地生态系统研究, E-mail: alleenzhang@126.com

measured. The results showed that in the first year of planting, N addition increased leaf N content but had no significant effect on the leaf C or P contents, resulting in a decreased C/N ratio. P addition significantly increased the leaf P content, resulting in a significant increase of 132.82% in soil available P content, while reducing C/N, C/P, and N/P ratios. In the second year, N addition significantly reduced soil nitrate nitrogen content by 8.71%, but had no significant impact on leaf C, N, and P contents. In contrast, P addition significantly increased the available phosphorus content in the soil by 268.64%, significantly increased leaf N and P contents, and decreased the C/N, C/P, and N/P ratios. In conclusion, N addition primarily influenced alfalfa leaf ecological stoichiometry during the early planting stage, with the optimal nitrogen application of 15 g/m<sup>2</sup>. Additionally, the response of leaf ecological stoichiometric characteristics to different nutrient additions changed.

**Keywords:** nitrogen addition; phosphorus addition; alfalfa; ecological stoichiometric characteristics; C/N ratio; C/P ratio; N/P ratio

紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)作为黄土高原区主要的多年生豆科牧草,具有较高的饲用价值<sup>[1]</sup>,被多次刈割后会导致系统有效养分产生不可逆的消耗,进而抑制其生长发育<sup>[2-3]</sup>。施肥作为紫花苜蓿主要的管理方式,只有在氮、磷肥合理配比下才能实现其优质高产。紫花苜蓿叶片的生态化学计量特征可有效反映其养分限制、养分利用效率和养分获取策略,为精准施肥提供技术支持<sup>[4]</sup>。

生态化学计量学是研究生态系统能量平衡和多重化学元素平衡的理论<sup>[5-6]</sup>,植物生态化学计量学作为其分支,主要探讨植物器官中碳(C)、氮(N)、磷(P)含量与生态系统功能之间的关系<sup>[7]</sup>。在这一学科中,植物的碳氮比、碳磷比可指示植物养分利用率<sup>[8]</sup>,氮磷比可用于评估养分供应状况<sup>[9-10]</sup>。氮、磷对植物的地上、地下生理生态过程具有重要影响,是限制植物生长的关键因子<sup>[11]</sup>。外源氮、磷输入会改变生态系统中养分供应状况<sup>[12]</sup>,提高土壤中无机氮、有效磷含量,从而促进植物对土壤养分的吸收和同化<sup>[13]</sup>。大量研究表明,氮添加显著提高了植物叶片氮含量<sup>[14-15]</sup>,而叶片磷含量则因物种不同而表现出不变或增加的趋势<sup>[16]</sup>,从而导致植物碳氮比降低<sup>[17-18]</sup>,氮磷比增加或不变<sup>[19-20]</sup>。磷添加显著提高了叶片磷含量,而对叶片氮含量没有显著影响,使植物碳磷比及氮磷比降低<sup>[21]</sup>。因此,叶片的生态化学计量特征作为植物养分有效性的“生物指示器”,不仅能够定量反映植物碳—氮—磷代谢的平衡状态,还能通过化学计量分析判定养分限制类型,为精准施肥提供量化依据。目前,尽管已有大量研究探讨了氮和磷对植物叶片生态化学计量特征的影响,但在黄土高原等特定生态区域,尚缺乏系统研究多水平氮、磷添加对紫花苜蓿叶片生态化学计量特征的综合影响。

本研究依托于山西农业大学草业学院试验站,通过对紫花苜蓿人工草地进行不同水平氮、磷

添加试验,探讨黄土高原地区主要栽培牧草紫花苜蓿叶片生态化学计量特征对氮、磷添加的响应规律,旨在为紫花苜蓿人工草地的施肥管理提供理论指导。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

试验地在山西省榆次市太谷区山西农业大学草业学院试验站(112°35'E, 37°25'N),海拔799 m,属于温带季风气候,雨热同期,昼夜温差较大。2022年,年均气温为12.16℃,降水量为452.98 mm;2023年,年均气温为12.39℃,降水量为444.83 mm。土壤类型以褐土为主,土壤本底调查的pH值为7.97,铵态氮含量为2.05 mg/kg,硝态氮含量为21.93 mg/kg,速效磷含量为3.49 mg/kg。样地于2021年8月建植,播种的紫花苜蓿品种为WL354,播种量为18 kg/hm<sup>2</sup>,播种深度为2~3 cm,间距为15 cm。

### 1.2 试验设计

2022年、2023年进行了2 a的氮磷施肥试验,采用随机区组设计,设0(N0)、5(N5)、10(N10)、15(N15)、20(N20) g/m<sup>2</sup> 5个氮处理,0(P0)、10(P10) g/m<sup>2</sup> 2个磷处理。其中,氮添加水平根据现有对紫花苜蓿施肥管理的研究设置,磷添加为缓解氮添加所引起的磷限制,且10 g/m<sup>2</sup>是试验中常见设置水平。共10个处理,分为5个区组,总计50个(4 m×5 m)样方,样方间设置1 m缓冲带。施肥分别在每年的返青期及刈割后进行,氮肥(尿素)采用撒施,磷肥(过磷酸钙)采用开沟施肥。为使肥料效应能充分体现对小区的影响,施肥后进行等时长灌水。

### 1.3 测定项目及方法

1.3.1 植物样品的采集与测定 利用收获法采集植物样品,将样品在烘箱105℃杀青30 min后,

65 °C 烘干至恒质量,称量并换算后记为该样方植物的地上干质量。利用根钻法取根,收集的根系过 2 mm 筛后洗净泥土,65 °C 烘干至恒质量,称量换算用于估算该样方植物的地下生物量。将测定完干质量的紫花苜蓿样品进行茎叶分离后,取叶片研磨并过 0.15 mm 筛,用于叶片碳、氮、磷含量测定。叶片碳、氮含量使用元素分析仪(Elementar Analysensysteme GmbH,Germany)测定。叶片磷含量测定时,先对样品进行 $H_2SO_4-HClO_4$ 消煮,使用 AA-3 全自动流动分析仪(Auto Analyzer 3 SEAL, Bran and Luebbe, Norderstedt, Germany)测定。

1.3.2 土壤样品的采集与测定 在收取植物样品后利用土钻法,钻取 0~10 cm 深度土层,每个样方取 2 个重复,用于土壤养分测定。土壤铵态氮和硝态氮,采用 $K_2SO_4$ 浸提法测定。称取过 2 mm 筛后的土样 10 g,加入 50 mL 0.5 mol/L  $K_2SO_4$ 溶液,220 r/min 振荡 1 h,取出静置,过滤后上清液存于离心管中,使用 AA-3 全自动流动分析仪(Auto Analyzer 3 SEAL, Bran and Luebbe, Norderstedt,

Germany)测定。速效磷采用 0.5 mol/L 碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法<sup>[22]</sup>,使用分光光度计(UV-5800 PC,China)在 700 nm 波长下测定。

#### 1.4 数据处理

利用 Microsoft Excel 2013 对数据进行整理与计算。用双因素方差分析氮、磷添加及其共同添加对紫花苜蓿草地土壤养分、总生物量及紫花苜蓿叶片生态化学计量特征的影响。采用 Pearson 相关性分析紫花苜蓿叶片生态化学计量特征与土壤养分及总生物量的关系。利用 SPSS 25.0 软件分析数据,采用 Origin 2021 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 紫花苜蓿总生物量及土壤养分对氮、磷添加的响应

在种植第 1 年,氮添加对紫花苜蓿的总生物量具有极显著影响( $P < 0.001$ ),其中,当氮添加量为 15 g/m<sup>2</sup>时,紫花苜蓿的生物量最高(图 1)。

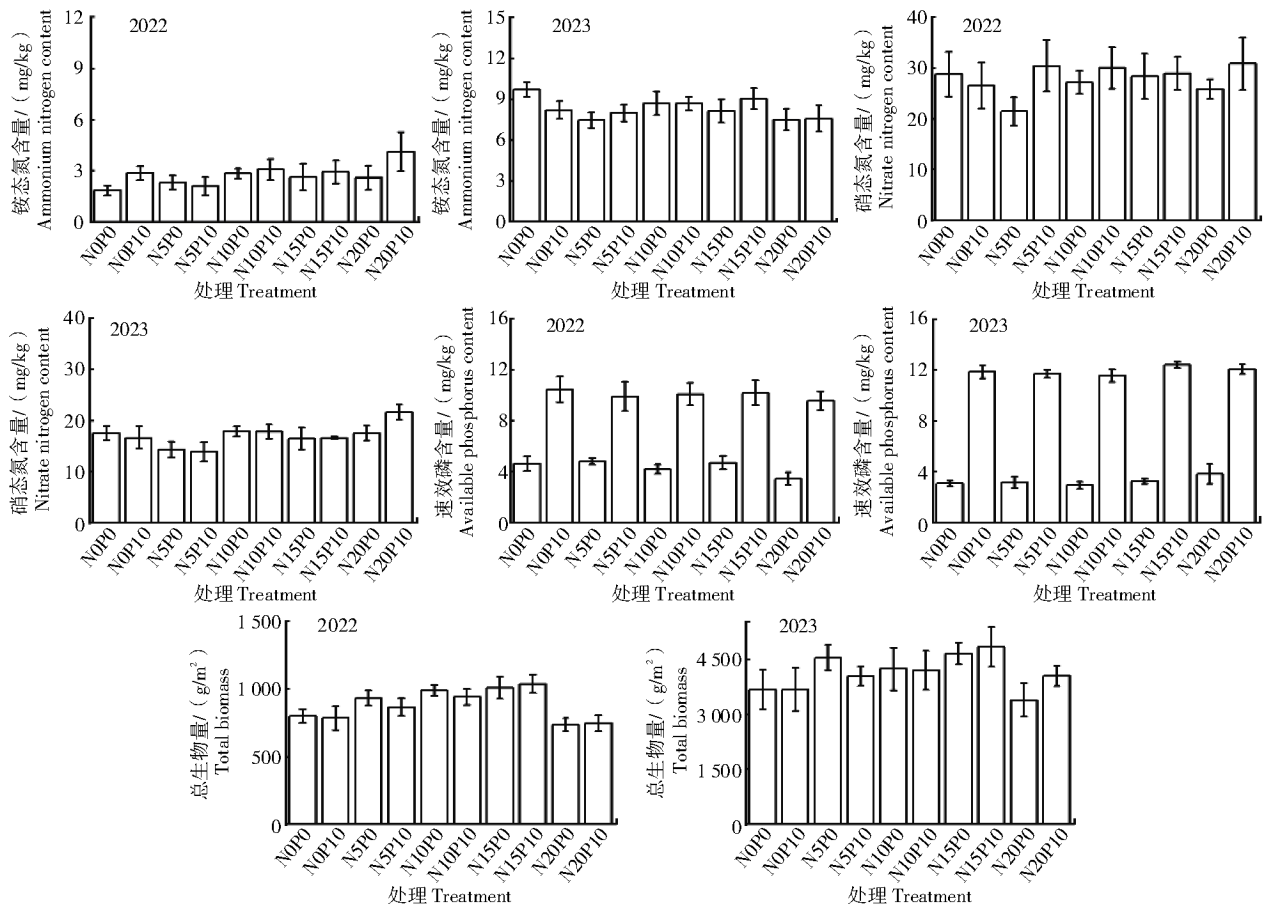


图 1 2022—2023 年氮、磷添加对紫花苜蓿总生物量及土壤养分的影响

Fig.1 Effects of nitrogen and phosphorus additions on total biomass in alfalfa and soil nutrients from 2022 to 2023

2022年磷添加使土壤速效磷含量极显著提高了132.82% ( $P < 0.001$ )。在种植第2年,氮添加使土壤硝态氮含量显著降低了8.71% ( $P < 0.05$ ),磷添加使土壤速效磷含量极显著提高了268.64% ( $P < 0.001$ ),而土壤铵态氮含量对氮、磷添加及其

共同添加均无显著响应(表1)。另外,在相同氮、磷添加处理下,种植第2年较种植第1年草地土壤铵态氮含量和总生物量均极显著升高 ( $P < 0.001$ ),土壤硝态氮含量极显著降低 ( $P < 0.001$ ),土壤速效磷含量无显著差异。

表1 双因素方差分析2022—2023年氮、磷添加及其共同添加对紫花苜蓿总生物量及土壤养分的影响

Tab.1 Two-way ANOVA analysis on the effects of nitrogen and phosphorus and their combined additions on total biomass in alfalfa and soil nutrients from 2022 to 2023

年份 Year	处理 Treatment	df	铵态氮含量 Ammonium nitrogen content		硝态氮含量 Nitrate nitrogen content		速效磷含量 Available phosphorus content		总生物量 Total biomass	
			F	P	F	P	F	P	F	P
			2022	N	4	1.08	0.38	0.17	0.96	0.58
	P	1	1.98	0.17	1.47	0.23	140.29	<0.001	0.20	0.66
	N×P	4	0.60	0.66	0.58	0.68	0.15	0.96	0.19	0.94
2023	N	4	1.47	0.23	3.23	<0.05	0.88	0.48	1.86	0.14
	P	1	0.00	0.99	0.31	0.58	1007.18	<0.001	0.04	0.84
	N×P	4	0.79	0.53	0.84	0.51	0.29	0.88	0.41	0.80

## 2.2 叶片碳、氮、磷含量对氮、磷添加的响应

紫花苜蓿叶片碳含量相对稳定,不受氮、磷添加及其共同添加的影响(图2)。在种植第1年,氮添加极显著提高了叶片氮含量 ( $P < 0.01$ ),磷添加使叶片磷含量极显著提高了30.81% ( $P < 0.001$ ) (表2);叶片氮含量随着氮添加量增加而增加,当

氮添加量为15 g/m<sup>2</sup>时,其趋于平稳。种植第2年,叶片氮、磷含量仅对磷添加响应极显著 ( $P < 0.001$ ),而对氮添加及氮、磷共同添加响应均不显著。另外,在相同氮、磷添加处理下,种植第2年较第1年紫花苜蓿叶片碳、氮、磷含量均极显著增加 ( $P < 0.001$ )。

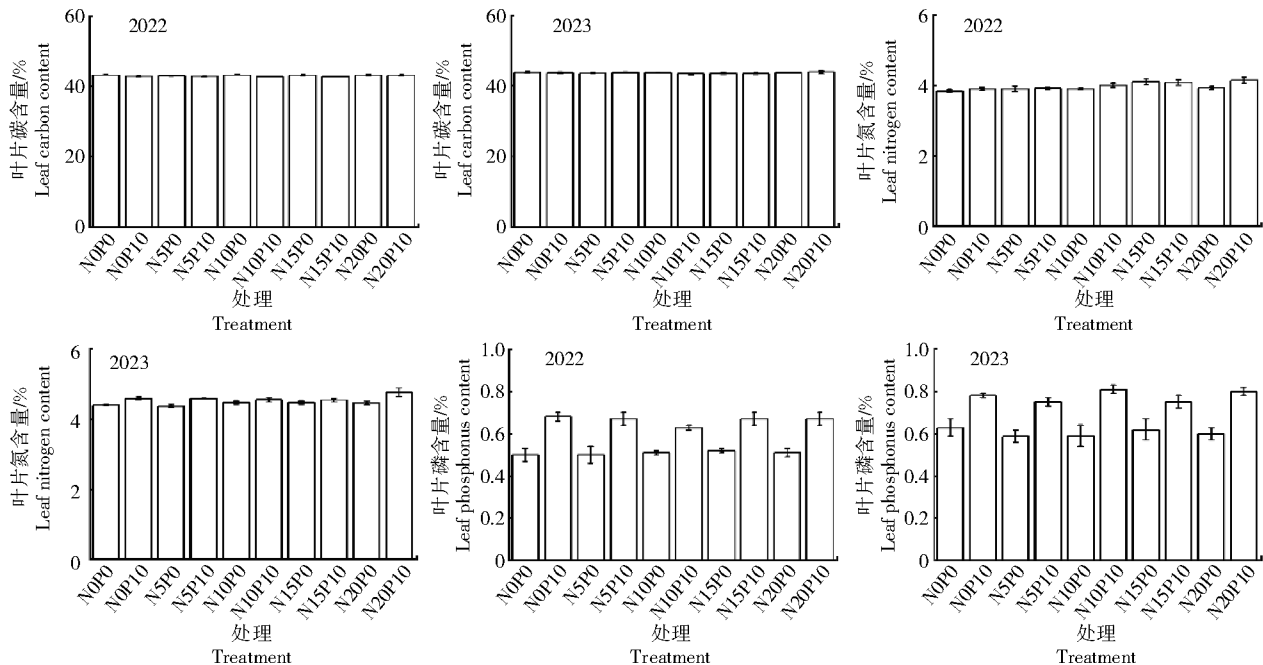


图2 2022—2023年氮、磷添加对紫花苜蓿叶片碳、氮、磷含量的影响

Fig.2 Effects of nitrogen and phosphorus additions on leaf carbon, nitrogen, and phosphorus contents in alfalfa from 2022 to 2023

表 2 双因素方差分析 2022—2023 年氮、磷添加及其共同添加对紫花苜蓿叶片碳、氮、磷含量的影响

Tab.2 Two-way ANOVA analysis of the effects of nitrogen and phosphorus and their combined additions on leaf carbon, nitrogen, and phosphorus contents in alfalfa from 2022 to 2023

年份 Year	处理 Treatment	df	叶片碳含量 Leaf carbon content		叶片氮含量 Leaf nitrogen content		叶片磷含量 Leaf phosphorus content	
			F	P	F	P	F	P
			2022	N	4	0.98	0.43	4.44
	P	1	0.62	0.44	3.82	0.06	97.70	<0.001
	N×P	4	0.59	0.67	1.07	0.38	0.37	0.83
2023	N	4	1.08	0.38	1.72	0.16	0.36	0.83
	P	1	0.06	0.80	22.25	<0.001	72.68	<0.001
	N×P	4	0.46	0.77	1.59	0.20	0.60	0.67

2.3 叶片碳氮比、碳磷比和氮磷比对氮、磷添加的响应

紫花苜蓿种植第 1 年,氮添加使叶片碳氮比极显著降低了 2.64% ( $P<0.01$ ),磷添加使叶片碳氮比、碳磷比及氮磷比分别极显著降低了 2.00% ( $P<0.01$ )、24.33% ( $P<0.001$ ) 及 20.19% ( $P<0.001$ )。其中,叶片碳氮比随氮添加量增加而增加,当氮添加量为 15 g/m<sup>2</sup>时,其趋于平稳(图 3)。种

植第 2 年,磷添加使叶片碳氮比、碳磷比及氮磷比分别极显著降低了 3.36% ( $P<0.001$ )、23.32% ( $P<0.001$ )、20.19% ( $P<0.001$ ),而氮、磷添加及其共同添加对叶片化学计量比均无显著影响(表 3)。另外,在相同氮、磷添加处理下,种植第 2 年较种植第 1 年的紫花苜蓿叶片碳氮比和碳磷比均极显著降低 ( $P<0.001$ ),而叶片氮磷比 2 a 间无显著差异。

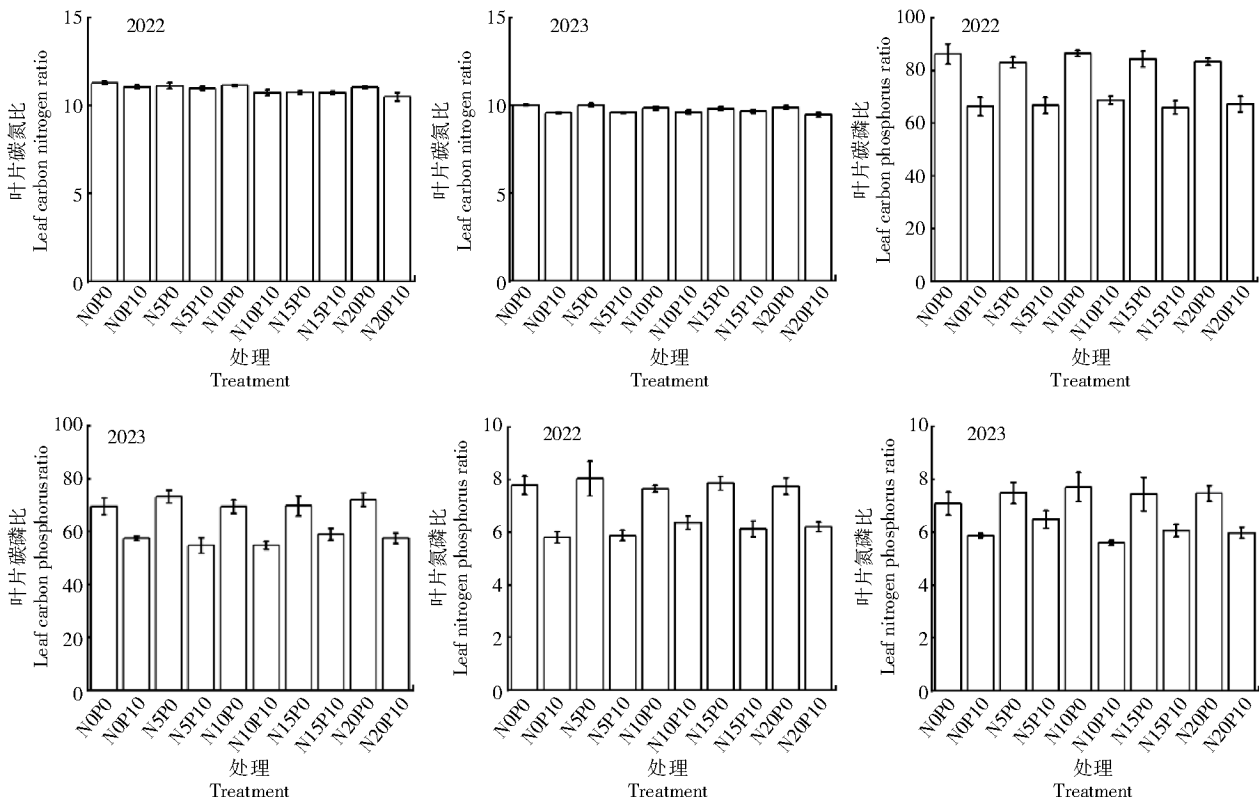


图 3 2022—2023 年氮、磷添加对紫花苜蓿叶片碳氮比、碳磷比、氮磷比的影响

Fig.3 Effects of nitrogen and phosphorus additions on leaf carbon nitrogen ratio, carbon phosphorus ratio, and nitrogen phosphorus ratio in alfalfa from 2022 to 2023

表3 双因素方差分析2022—2023年氮、磷添加及其共同添加对紫花苜蓿叶片碳氮比、碳磷比、氮磷比的影响  
 Tab.3 Two-way ANOVA analysis of the effects of nitrogen and phosphorus and their combined additions on leaf carbon nitrogen ratio, carbon phosphorus ratio, and nitrogen phosphorus ratio in alfalfa from 2022 to 2023

年份 Year	处理 Treatment	df	叶片碳氮比 Leaf carbon nitrogen ratio		叶片碳磷比 Leaf carbon phosphorus ratio		叶片氮磷比 Leaf nitrogen phosphorus ratio	
			F	P	F	P	F	P
			2022	N	4	4.02	<0.01	0.36
	P	1	10.73	<0.01	110.65	<0.001	70.89	<0.001
	N×P	4	1.20	0.33	0.17	0.95	0.51	0.73
2023	N	4	0.65	0.63	0.34	0.85	0.19	0.94
	P	1	32.33	<0.001	79.47	<0.001	24.21	<0.001
	N×P	4	1.01	0.41	0.70	0.60	0.36	0.83

## 2.4 叶片生态化学计量特征与土壤养分及总生物量的关系

紫花苜蓿叶片生态化学计量与土壤养分及总生物量的皮尔逊相关性分析结果显示(表4),种植第1年,叶片碳含量与总生物量呈极显著负相关( $P<0.01$ ),叶片磷含量与速效磷含量呈极显著正

相关( $P<0.01$ ),叶片碳磷比、氮磷比与速效磷含量均呈极显著负相关( $P<0.01$ ),叶片碳氮比与铵态氮、硝态氮含量均呈极显著负相关( $P<0.01$ )。种植第2年,叶片氮、磷含量与速效磷含量呈极显著正相关( $P<0.01$ ),而叶片碳氮比、碳磷比、氮磷比与速效磷含量均呈极显著负相关( $P<0.01$ )。

表4 紫花苜蓿叶片生态化学计量特征与土壤养分及总生物量的相关性分析  
 Tab.4 Correlation analysis between ecological stoichiometric characteristics of alfalfa leaves and soil nutrients and total biomass

指标 Indicator	2022				2023			
	铵态氮含量 Ammonium nitrogen content	硝态氮含量 Nitrate nitrogen content	速效磷含量 Available phosphorus content	总生物量 Total biomass	铵态氮含量 Ammonium nitrogen content	硝态氮含量 Nitrate nitrogen content	速效磷含量 Available phosphorus content	总生物量 Total biomass
叶片碳含量 Leaf carbon content	-0.134	-0.132	-0.321	-0.372**	-0.156	0.067	0.006	0.177
叶片氮含量 Leaf nitrogen content	0.212	0.115	0.208	0.113	-0.145	0.261	0.543**	0.059
叶片磷含量 Leaf phosphorus content	0.140	0.153	0.710**	0.070	0.066	0.017	0.780**	0.082
叶片碳氮比 Leaf carbon nitrogen ratio	-0.384**	-0.289**	-0.245	-0.125	0.076	-0.071	-0.631**	-0.050
叶片碳磷比 Leaf carbon phosphorus ratio	-0.166	-0.104	-0.714**	-0.094	-0.078	0.01	-0.794**	-0.044
叶片氮磷比 Leaf nitrogen phosphorus ratio	-0.062	-0.132	-0.663**	-0.043	-0.133	0.139	-0.600**	-0.107

注:\*\*表示各指标间极显著相关( $P<0.01$ )。

Note: \*\* indicated extremely significant correlation among the indicators( $P<0.01$ ).

## 3 结论与讨论

### 3.1 氮添加对紫花苜蓿叶片生态化学计量特征的影响

植物生态化学计量特征可指示植物营养限制、营养循环及其对环境的响应<sup>[23]</sup>。氮、磷与植物

光合作用、遗传物质组成及能量储存密切相关,是陆地生态系统中最重要限制性营养元素<sup>[11,24]</sup>。植物与土壤是一个相互联系、密不可分的整体<sup>[25]</sup>,外源氮输入会直接进入土壤,调控土壤养分含量,植物地下根系从土壤中汲取养分用于生长发育。当土壤中可利用有效养分含量发生变化时,会直

接作用于植物根系,影响其对土壤养分的吸收和同化,进而影响植物生态化学计量特征。本研究结果显示,紫花苜蓿种植第 1 年时,氮添加显著增加了叶片氮含量,当氮添加量为  $15 \text{ g/m}^2$  时,叶片氮含量会趋于平稳。这可能是由于外源氮添加使土壤中含氮底物增加,触发以微生物为主导的氮矿化和硝化过程,提高土壤中氮素的周转速率<sup>[26]</sup>,并且氮添加可以提高与土壤氮素循环有关的脲酶活性<sup>[27]</sup>,最终均使土壤中可供植物吸收利用的有效氮含量增加,从而使叶片氮含量增加,而叶片碳氮比降低。孙小妹等<sup>[28]</sup>对亚高寒草地的研究表明,黄花苜蓿的年氮添加量为  $5 \text{ g/m}^2$  时,叶片氮含量达到最大值,再提高氮添加量,叶片氮含量会降低。这与本研究变化规律一致,但氮添加阈值不同,可能是由不同生长环境导致。紫花苜蓿种植第 2 年时,氮添加虽使叶片氮含量有所增加,但不显著,可能是因为紫花苜蓿在建植第 2 年相较于第 1 年生产力更高<sup>[29]</sup>,而植物的稀释效应使叶片氮含量无显著变化。另外,种植第 2 年时紫花苜蓿叶片氮含量增加,而叶片碳氮比降低,这可能是因为紫花苜蓿建植第 2 年的生长速率更快,会汲取更多的土壤养分,从而使叶片氮含量更高,并且本研究也显示出种植第 2 年时紫花苜蓿草地土壤的有效氮含量有所降低。这一现象符合现有研究提出的“适应性生长假说”,当植物处于可利用养分充足的环境下,会保持较低的碳氮比,实现快速生长<sup>[30]</sup>。

碳作为植物的基本骨架物质,不易受外界环境的干扰,通常植物碳含量相对稳定,不易发生变化<sup>[8]</sup>。本研究显示,氮添加下叶片碳含量无显著变化,这可能是因为氮添加促使总生物量增加,而生物量增加的稀释效应使植物叶片碳含量无显著变化<sup>[31]</sup>。这与王洪义等<sup>[18]</sup>在呼伦贝尔草地研究结果相同,氮添加对同为豆科植物的披针叶黄花叶片碳含量无显著影响。但在不同的生态系统的研究结果也有所差异,游郭虹等<sup>[20]</sup>在高寒草甸的结果表明,氮添加显著降低豆科植物叶片碳含量,而对莎草科、杂草类植物叶片碳含量无显著影响。

氮添加通常会促进土壤磷酸酶活性来提高土壤速效磷含量,从而作用于植物磷吸收,增加植物磷含量。但氮添加的响应还会受物种、施氮时间长短、生境等影响。本研究表明,氮添加对叶片磷含量无显著影响,从而对叶片碳磷比也无显著影响。一方面,氮添加对土壤速效磷含量无显著影

响,不改变植物可利用有效磷含量,从而使叶片磷含量变化不显著。另一方面,有研究显示,氮添加对叶片磷含量的影响主要依赖于物种的特异性<sup>[32]</sup>,氮添加会显著降低菊科植物的叶片磷含量,而对豆科和禾本科植物的叶片磷含量调控作用很小<sup>[21]</sup>。鲍平安等<sup>[14]</sup>在荒漠草地开展的氮添加试验结果同样表明,氮添加下叶片磷含量相对稳定,无显著变化。

### 3.2 磷添加对紫花苜蓿叶片生态化学计量特征的影响

紫花苜蓿作为一种喜磷的豆科牧草,磷肥在其生长和新陈代谢中至关重要。磷是合成植物体中核酸、磷脂、ATP 等含磷酶的组分,参与植物生长代谢中的多个生理生化过程。磷添加能促进紫花苜蓿早期根系的形成和生长,提高对外界环境的适应能力,利于植物越冬。本研究显示,磷添加对叶片碳含量无显著影响。这与呼伦贝尔草地<sup>[18]</sup>、青藏高原高寒草地<sup>[20]</sup>开展的磷添加对植物叶片碳含量影响的试验结果一致。

磷添加可以改善根际土壤 pH 值,促进有机氮的矿化,或提高土壤酶活性(如酸性磷酸酶)等间接影响氮循环,缓解植物—土壤生态系统中氮的损失,从而作用于植物吸收<sup>[33-34]</sup>。本研究显示,在紫花苜蓿种植第 2 年,磷添加使叶片氮含量增加,进而使叶片碳氮比降低。一方面,磷添加有助于激活紫花苜蓿叶片硝酸还原酶等生长过程中关键酶活性<sup>[35]</sup>,增强紫花苜蓿对氮素吸收和同化能力,使植物地上部分氮素含量增加。另一方面,磷添加使紫花苜蓿的根瘤数目增多,固氮酶活性增强<sup>[36]</sup>,使土壤中植物可利用氮素增加<sup>[37]</sup>,从而作用于叶片氮含量。

外源磷输入会加速土壤有机质的循环利用,促进磷素活化<sup>[38]</sup>,使土壤中供植物新陈代谢和生长的速效磷含量增加,进而使植物磷含量增加。本研究结果表明,磷添加使土壤速效磷含量显著提高,从而促使叶片磷含量显著提高,而叶片碳磷比、氮磷比显著降低。这一结果与呼伦贝尔草原<sup>[18-19]</sup>的磷添加试验结果一致。此外,本试验结果显示,氮、磷共同添加对植物的碳、氮、磷含量及其化学计量比均无显著影响,说明植物对氮、磷的吸收耦合性较小,氮和磷各自影响植物对氮、磷的吸收<sup>[39]</sup>。

连续 2 a 氮、磷添加试验结果表明,氮添加仅

在苜蓿种植初期改变叶片氮含量和叶片碳氮比。当氮添加量为 15 g/m<sup>2</sup>时,叶片氮含量、叶片碳氮比及总生物量会趋于平稳。磷添加后提高土壤有效氮、速效磷含量,使叶片氮、磷含量增加,导致叶片氮磷比降低,这反映了植物对环境变化的响应情况,可为紫花苜蓿优产高质的可持续施肥管理提供参考依据。

#### 参考文献:

- [1] WANG Y F, ZHANG Z Q, LIU H M, et al. Overexpression of an alfalfa (*Medicago sativa*) gene, *MsDUF*, negatively impacted seed germination and response to osmotic stress in transgenic tobacco[J]. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 2018, 132(3):525-534.
- [2] FAN J W, DU Y L, WANG B R, et al. Forage yield, soil water depletion, shoot nitrogen and phosphorus uptake and concentration, of young and old stands of alfalfa in response to nitrogen and phosphorus fertilisation in a semiarid environment[J]. *Field Crops Research*, 2016, 198:247-257.
- [3] 李向林,何峰. 苜蓿营养与施肥[M]. 北京:中国农业出版社, 2017.
- LI X L, HE F. Alfalfa nutrition and fertilization[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2017.
- [4] 孙延亮,赵宇哲,魏孔钦,等. 不同休眠级紫花苜蓿茎和叶的碳、氮、磷化学计量特征[J]. *中国草地学报*, 2022, 44(5):9-19.
- SUN Y L, ZHAO Y Z, WEI K Q, et al. Stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in stems and leaves of alfalfa with different fall dormancy levels[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2022, 44(5):9-19.
- [5] ELSER J J, DOBBERFUHL D R, MACKAY N A, et al. Organism size, life history, and N:P stoichiometry[J]. *BioScience*, 1996, 46(9):674-684.
- [6] 曾德慧,陈广生. 生态化学计量学:复杂生命系统奥秘的探索[J]. *植物生态学报*, 2005, 29(6):1007-1019.
- ZENG D H, CHEN G S. Ecological stoichiometry: a science to explore the complexity of living systems[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2005, 29(6):1007-1019.
- [7] TIAN D, YAN Z B, FANG J Y. Review on characteristics and main hypotheses of plant ecological stoichiometry[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, 45(7):682-713.
- [8] LI Z Y, QIU X R, SUN Y, et al. C:N:P stoichiometry responses to 10 years of nitrogen addition differ across soil components and plant organs in a subtropical *Pleioblastus amarus* forest[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 796:148925.
- [9] ZHANG L X, BAI Y F, HAN X G. Differential responses of N:P stoichiometry of *Leymus chinensis* and *Carex korshinskyi* to N additions in a steppe ecosystem in Nei Mongol[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2004, 46(3):259-270.
- [10] GÜSEWELL S. N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance[J]. *New Phytologist*, 2004, 164(2):243-266.
- [11] ELSER J J, BRACKEN M E S, CLELAND E E, et al. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2007, 10(12):1135-1142.
- [12] LÜ X T, REED S, YU Q, et al. Convergent responses of nitrogen and phosphorus resorption to nitrogen inputs in a semi-arid grassland[J]. *Global Change Biology*, 2013, 19(9):2775-2784.
- [13] 林伟山,德科加,张琳,等. 氮、磷添加对青藏高寒草甸土壤碳氮磷化学计量特征影响的Meta分析[J]. *草地学报*, 2022, 30(12):3345-3354.
- 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[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(12):3345-3354.
- [14] 鲍平安,邱开阳,黄业芸,等. 荒漠草原植物在氮磷添加下叶功能性状特征及其可塑性[J]. *草业学报*, 2024, 33(3):97-106.
- BAO P A, QIU K Y, HUANG Y Y, et al. Leaf functional trait characteristics and plasticity of desert steppe plants under nitrogen and phosphorus addition[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(3):97-106.
- [15] LÜ X T, KONG D L, PAN Q M, et al. Nitrogen and water availability interact to affect leaf stoichiometry in a semi-arid grassland[J]. *Oecologia*, 2012, 168(2):301-310.
- [16] 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.
- [17] HENRY H A L, CLELAND E E, FIELD C B, et al. Interactive effects of elevated CO<sub>2</sub>, N deposition and climate change on plant litter quality in a California annual grassland[J]. *Oecologia*, 2005, 142(3):465-473.
- [18] 王洪义,丁睿,王智慧,等. 氮、磷添加对草地不同冠层植物叶片和根系生态化学计量特征的影响[J]. *草业学报*, 2020, 29(8):37-45.
- WANG H Y, DING R, WANG Z H, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on C:N:P ecological stoichiometry in leaves and roots of different canopy species in Hulunbuir grassland[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(8):37-45.
- [19] 高宗宝,王洪义,吕晓涛,等. 氮磷添加对呼伦贝尔草甸草原4种优势植物根系和叶片C:N:P化学计量特征的影响[J]. *生态学报*, 2017, 36(1):80-88.
- GAO Z B, WANG H Y, LÜ X T, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on C:N:P stoichiometry in roots and leaves of four dominant plant species in a meadow steppe of Hulunbuir[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, 36(1):80-88.
- [20] 游郭虹,刘丹,王艳丽,等. 高寒草甸植物叶片生态化学计量特征对长期氮肥添加的响应[J]. *草业学报*, 2022, 31(9):50-62.
- YOU G H, LIU D, WANG Y L, et al. Response of plant leaf ecological stoichiometric characteristics to long-term nitrogen addition in alpine meadow[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022,

- 31(9):50-62.
- [21] 肖红,戎郁萍,李鹏珍,等. 呼伦贝尔草甸草原主要功能群植物碳、氮、磷化学计量特征对氮磷添加的响应[J]. 中国草地学报, 2023, 45(10):1-11.  
XIAO H, RONG Y P, LI P Z, et al. Response of carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometric characteristics in dominant plant functional groups of the Hulun Buir meadow steppe to nitrogen and phosphorus addition[J]. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(10):1-11.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.  
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [23] REICH P B, OLEKSYN J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(30):11001-11006.
- [24] SHI B, LING X, CUI H, et al. Response of nutrient resorption of *Leymus chinensis* to nitrogen and phosphorus addition in a meadow steppe of Northeast China[J]. Plant Biology, 2020, 22(6):1123-1132.
- [25] 聂明鹤,沈艳,陆颖,等. 宁夏盐池县荒漠草原区不同群落优势植物叶片-土壤生态化学计量特征[J]. 草地学报, 2021, 29(1):131-140.  
NIE M H, SHEN Y, LU Y, et al. Ec stoichiometric characteristics of dominant plant leaves-soil ecology in different communities of desert steppe in Yanchi county, Ningxia[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(1):131-140.
- [26] 刘君政,王鹏,肖汉玉,等. 中国陆地生态系统土壤氮矿化速率和硝化速率及影响因素: 基于文献数据的统计分析[J]. 生态学报, 2020, 40(12):4207-4218.  
LIU J Z, WANG P, XIAO H Y, et al. Soil nitrogen mineralization rate and nitrification rate in Chinese terrestrial ecosystems and the factors affecting them-statistical analysis based on literature data[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(12):4207-4218.
- [27] SIMAN F C, ANDRADE F V, PASSOS R R, et al. Nitrogen fertilizers and volatilization of ammonia, carbonic gas emissions and urease activity[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2022, 53(4):426-438.
- [28] 孙小妹,陈菁菁,李金霞,等. 施肥后青藏高原高寒草甸典型物种生态化学计量特征及光合特性的变化[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2018, 54(6):804-810.  
SUN X M, CHEN J J, LI J X, et al. Effects of nutrient addition on ecological stoichiometric characteristics and photosynthesis of representative species in a sub-alpine meadow community[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2018, 54(6):804-810.
- [29] 王伟,贾玉山,格根图,等. 种植年限对紫花苜蓿生产力和品质的影响[J]. 草学, 2017(4):11-17.  
WANG W, JIA Y S, GE G T, et al. Effects of alfalfa with growth years on the productivity and quality[J]. Journal of Grassland and Forage Science, 2017(4):11-17.
- [30] ZHANG J H, HE N P, LIU C C, et al. Variation and evolution of C: N ratio among different organs enable plants to adapt to N-limited environments[J]. Global Change Biology, 2020, 26(4):2534-2543.
- [31] JARRELL W M, BEVERLY R B. The dilution effect in plant nutrition studies[M]//BRADY N C. Advances in agronomy. New York: Academic Press, 1981:197-224.
- [32] LÜ X T, REED S C, YU Q, et al. Nutrient resorption helps drive intra-specific coupling of foliar nitrogen and phosphorus under nutrient-enriched conditions[J]. Plant and Soil, 2016, 398(1):111-120.
- [33] 姜彧宸,冯月,池田,等. 不同磷肥水平和种植模式对土壤养分含量和酶活性的影响[J]. 山西农业科学, 2023, 51(7):742-749.  
JIANG Y C, FEN Y, CHI T, et al. Effects of different phosphate fertilizer levels and planting patterns on soil nutrient content and enzyme activity[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2023, 51(7):742-749.
- [34] SUN Y L, WANG X Z, MA C H, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on agronomic characters, photosynthetic performance and anatomical structure of alfalfa in northern Xinjiang, China[J]. Agronomy, 2022, 12(7):1613.
- [35] 李强,黄迎新,周道玮,等. 土壤氮磷添加下豆科草本植物生物固氮与磷获取策略的权衡机制[J]. 植物生态学报, 2021, 45(3):286-297.  
LI Q, HUANG Y X, ZHOU D W, et al. Mechanism of the trade-off between biological nitrogen fixation and phosphorus acquisition strategies of herbaceous legumes under nitrogen and phosphorus addition[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021, 45(3):286-297.
- [36] RUI N P, SHENG M, MING G, et al. Response of olsen-P to P balance in black loessial soil under long-term fertilization[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(19):4008-4015.
- [37] 秦仕华,从春蕾,闫茹,等. 外加碳磷对黔中黄壤微生物群落特征及构建过程的影响[J]. 河南农业科学, 2025, 54(7):84-97.  
QIN S H, CONG C L, YAN R, et al. Effects of carbon and phosphorus addition on the characteristics and construction process of microbial communities in the yellow soil of central Guizhou[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2025, 54(7):84-97.
- [38] RUI N P, SHENG M, MING G, et al. Response of olsen-P to P balance in black loessial soil under long-term fertilization[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(19):4008-4015.
- [39] SUN Y, WANG C T, CHEN H Y H, et al. Responses of C: N stoichiometry in plants, soil, and microorganisms to nitrogen addition[J]. Plant and Soil, 2020, 456(1):277-287.