

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.07.012

引用格式:刘晓阳,葛美娇,李紫微,等.刈割和施肥对紫花苜蓿叶片氮磷重吸收效率的影响[J].草地学报,2026,34(7):2472—2482

LIU Xiao-yan, GE Mei-jiao, LI Zi-wei, et al. Effects of Mowing and Fertilization on Nitrogen and Phosphorus Reabsorption Efficiency in Alfalfa Leaves[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(7):2472—2482

刈割和施肥对紫花苜蓿叶片氮磷重吸收效率的影响

刘晓阳,葛美娇,李紫微,海昕伟,贾晨雪,高凯*

(内蒙古民族大学草业学院,内蒙古通辽028000)

摘要:刈割和施肥通过对苜蓿养分重吸收生理过程的干扰,可优化其生长季内系统养分的转移和储备,为研究其对紫花苜蓿叶片养分重吸收的差异性,寻找植株养分收支平衡点。本试验以不同刈割(3次·年⁻¹和4次·年⁻¹,记为M1和M2)和施肥(P₂O₅和K₂O为3:5的比例设置5个施肥梯度,记为CK、F1、F2、F3、F4)处理条件下紫花苜蓿叶片为研究对象,测定成熟叶片和衰老叶片的碳、氮、磷含量,分析其氮磷重吸收效率的特征。结果表明:在刈割和施肥处理下显著提高叶片的氮磷含量($P<0.05$);叶片碳氮比和碳磷比整体呈下降趋势,氮磷比呈先升高后下降的趋势且均大于16;叶片的氮磷重吸收效率分别为25.08%~42.79%、29.05%~44.30%;氮磷重吸收效率与新叶的碳氮磷呈显著正相关性。刈割促进氮磷重吸收,施肥则先促进后抑制,M2F2的成熟叶碳氮含量和衰老叶氮磷重吸收效率最高,此时紫花苜蓿的养分获取策略最佳。

关键词:紫花苜蓿;成熟叶;衰老叶;刈割;施肥;化学计量特征;氮磷重吸收

中图分类号:S431.14

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)07-2472-11

Effects of Mowing and Fertilization on Nitrogen and Phosphorus Reabsorption Efficiency in Alfalfa Leaves

LIU Xiao-yan, GE Mei-jiao, LI Zi-wei, HAI Xin-wei, JIA Chen-xue, GAO Kai*

(College of Grassland Science, Inner Mongolia MINZU University, Tongliao, Inner Mongolia 028000, China)

Abstract: Mowing and fertilization can optimize the transfer and storage of systemic nutrients during the growing season by interfering with the physiological process of nutrient reabsorption in alfalfa. This study was to investigate the differences in nutrient reabsorption in alfalfa leaves and find the balance point of plant nutrient balance. The experiment set up five fertilization gradients (CK, F1, F2, F3, F4) under different mowing (3 times a year and 4 times a year, denoted as M1 and M2) and fertilization (P₂O₅ and K₂O ratio of 3:5) conditions on alfalfa leaves. The carbon, nitrogen, and phosphorus contents of mature and senescent leaves were measured, and the characteristics of nitrogen and phosphorus reabsorption efficiency were analyzed. The results showed that mowing and fertilization significantly increased the nitrogen and phosphorus content in leaves ($P<0.05$). The overall carbon to nitrogen ratio and carbon to phosphorus ratio in leaves showed a decreasing trend, while the nitrogen to phosphorus ratio showed a trend of first increasing and then decreasing, both of which were greater than 16. The nitrogen and phosphorus reabsorption efficiencies in leaves were 25.08%-42.79% and 29.05%-44.30%, respectively. The nitrogen and phosphorus reabsorption efficiency was significantly positively correlated with the carbon, nitrogen, and phosphorus content of new leaves. Mowing promoted nitrogen and phosphorus reabsorption, while fertilization first promoted and then inhibited it. M2F2 had the highest carbon and nitrogen content in mature leaves and nitrogen and phosphorus reabsorption efficiency in senescent leaves, making the best nutrient acquisition strategy for alfalfa.

Key words: Mature leaves; Senescent leaves; Mowing; Apply fertilizer; Stoichiometric characteristics; Nitrogen phosphorus reabsorption

收稿日期:2025-12-05;修回日期:2026-02-03

基金项目:国家自然科学基金项目(32260343);内蒙古自治区自然科学基金项目(2021MS03085)资助

作者简介:刘晓阳(2000-),男,汉族,河南濮阳人,硕士研究生,主要从事饲草高产栽培与利用研究,E-mail: lenovo-20210303@hotmail.com; *通信作者 Author for correspondence, E-mail: gaokai555@126.com

紫花苜蓿(*Medicago sativa*)作为全球广泛栽培的优质豆科牧草,因高蛋白含量、卓越的固氮能力以及较强的环境适应性,使其在畜牧业发展、土壤改良和碳氮循环中占据重要地位^[1]。刈割和施肥是人工草地的重要管理措施,许多学者以围绕刈割和施肥对紫花苜蓿产量和营养品质的影响展开了研究^[2-3]。然而,高效管理人工草地不仅需要关注产量与品质,还需深入理解植物的养分利用策略,尤其是叶片碳(C)、氮(N)、磷(P)的化学计量特征及其重吸收效率。刈割和施肥会直接影响到叶片化学计量特征及养分重吸收效率。碳(C)、氮(N)和磷(P)是构成植物体最重要的生命元素,其化学计量比可以反映出植物的养分利用效率及生态系统的养分限制状况^[4]。养分重吸收是植物将养分从衰老器官转移到其他活组织中保存或直接利用的过程,既是植物保存和优化利用N、P养分的重要策略,也在维持植物化学计量平衡方面发挥着重要作用^[5-6];重吸收效率或重吸收度是衡量植物对营养元素重复利用水平的重要指标^[7],对理解植物养分平衡规律及养分利用策略具有重要意义,也可为区域人工草地提质增效提供参考。

刈割可通过截断地上部分光合产物的输出,可改变植物体内养分分配策略,而施肥可直接提升土壤养分有效性,从而调节植物体内养分代谢过程^[8]。有研究表明,刈割能够改变植物地上部中C、N、P含量,并调节各生长阶段的养分含量^[9],氮磷添加可缓解养分限制并提高植物叶片氮磷含量^[10],当养分的输出与输入达到平衡可使养分资源充分利用,可促进紫花苜蓿的生长。根茎型苜蓿在刈割后主要通过增强根系扩展能力维持养分吸收,而直根型苜蓿则更依赖叶片养分重吸收^[11]。另有研究表明,刈割通过加速叶片衰老促进氮磷重吸收^[12],而施肥对叶片养分重吸收效率可能呈抑制^[13]或促进^[14]、或无显著影响^[15]。但是,上述结论在豆科植物紫花苜蓿中是否同样成立,尤其是刈割和施肥交互作用下的动态响应规律,仍需进一步验证。

本研究以紫花苜蓿叶片为研究对象,不同刈割频次与施肥处理会通过改变紫花苜蓿越冬前养分储量、根系活力及土壤养分供应水平,进而调控翌年头茬叶片的氮(N)、磷(P)重吸收效率。通过控制刈割频率与施肥水平,探讨其对紫花苜蓿养分利用策略的影响。研究结果不仅为深入解析豆科植物养分重吸收机制提供新的视角,也可为优化紫花

苜蓿栽培管理与提升养分资源利用效率提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地点位于内蒙古通辽市内蒙古民族大学农牧业科技示范园区(43°36'N, 122°22'E),属典型的温带大陆性季风气候,年平均气温6.4℃,极端最低温-30.9℃,≥10℃积温3184℃,无霜期150 d,年均降水量399.1 mm,生长季降水量占全年的89%。土壤为风沙土,土壤有机质含量4.86 g·kg⁻¹速效钾94.55 mg·kg⁻¹,速效磷4.33 mg·kg⁻¹碱解氮11.10 mg·kg⁻¹,pH值为7.6。

1.2 试验材料

试验材料为直根型紫花苜蓿‘东苜二号’,试验所用肥料为磷酸二铵(N≥18%, P₂O₅≥46%),氯化钾(K₂O≥60%),底肥复合肥(N-P₂O₅-K₂O≥15%-15%-15%)。

1.3 试验设计

紫花苜蓿人工草地2022年建植,播种量15 kg·hm⁻²,行距25 cm。2022年末进行试验处理,2023年进行田间试验。采用双因素随机区组设计,刈割频率设2个处理^[16](3次·年⁻¹和4次·年⁻¹),前3次刈割于紫花苜蓿初花期,第4次刈割于浇越冬水之前,施肥处理按照P₂O₅和K₂O配比为3:5的比例^[17]设置5个施肥梯度(即0, 0.5, 1, 1.5和2倍)(表1),刈割时间如表2所示;共10个处理组合,4个重复,共40个小区,小区面积2.5 m×7 m。返青期底肥施复合肥150 kg·hm⁻²,每次刈割后进行混合施肥处理,进行撒施,共施3次。灌水条件采用微喷,当0~20 cm土壤层含水量低于10%时,即需适当补水,每次灌溉40分钟,统一田间管理。

1.4 叶片样品采集

2024年头茬紫花苜蓿初花期,在每个小区随机选取10株进行衰老叶和成熟叶采集。衰老叶是指叶片仍保留于苜蓿植株茎秆上,但在轻轻抖动苜蓿时会自然掉落下来的叶片;成熟叶是指苜蓿叶腋处颜色深绿且成熟的三出复叶^[18]。采集用于指标分析的样品带回实验室洗净装入信封,样品经105℃

表 1 试验地刈割频率和施肥处理设计方案

Table 1 Mowing frequency and fertilization treatment design scheme

处理组合 Handling combinations (10 processes in total)	双因素 Two-factor		
	刈割频次 Mowing frequency/times	施肥量 $P_2O_5:K_2O$ Fertilization amount $P_2O_5:K_2O/(kg \cdot hm^{-2})$	磷酸二铵中的 N N in diammonium phosphate/ $(kg \cdot hm^{-2})$
M1CK	3	0:0	0
M1F1	3	22.5:37.5	8.78
M1F2	3	45:75	17.55
M1F3	3	67.5:112.5	26.33
M1F4	3	90:150	35
M2CK	4	0:0	0
M2F1	4	22.5:37.5	8.78
M2F2	4	45:75	17.55
M2F3	4	67.5:112.5	26.33
M2F4	4	90:150	35

表 2 紫花苜蓿各茬次刈割时间

Table 2 Mowing time of alfalfa

年份 Year	刈割时间 Mowing time			
	第一茬 1 st mow	第二茬 2 nd mow	第三茬 3 rd mow	第四茬 4 th mow
2023 年	6 月 7 日	7 月 14 日	8 月 17 日	10 月 5 日

杀青处理 30 min 后,再置于烘箱 65℃烘干至恒重。烘干后样品用粉碎机磨碎测定指标。

1.5 指标测定

碳含量(有机碳):采用重铬酸钾外加热法测定^[19]

氮含量:采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消化-凯氏定氮法测定^[19]

磷含量:采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 消化-钼锑抗比色法测定^[19]

1.6 养分重吸收效率的计算方法

参照以往研究,养分重吸收效率(RE%)计算方法如下^[20]:

$$RE(\%) = \left(1 - \frac{MLCF \times N_s}{N_m}\right) \times 100\%$$

式中: N_m 表示成熟叶养分浓度; N_s 表示衰老叶养分浓度;MLCF表示质量损失校正因子,常绿植物为 0.78,落叶植物为 0.784。

1.7 数据分析

采用 Microsoft Excel 2019 进行数据处理和制图,运用 SPSS 24.0 软件进行双因素方差分析,随后采用 Duncan 新复极差法通过多重比较进行差异显著性检验($P < 0.05$)。图表中的数据均以“平均

值±标准误”的格式表示。使用非线性回归拟合养分重吸收效率和施肥水平之间的关系,N、P 重吸收效率与成熟叶和衰老叶养分含量间的相关性关系采用 Pearson 相关分析。

2 结果与分析

2.1 紫花苜蓿叶片的碳、氮、磷含量对刈割和施肥的响应

紫花苜蓿成熟叶中氮磷含量均存在显著差异,与对照相比分别显著提高 34.29%、55.56% ($P < 0.05$) (图 1A、B、C)。紫花苜蓿成熟叶中氮含量随施肥量的增加呈先升高后降低的趋势,磷含量随施肥量的增加呈不断升高的趋势。M1F2 的氮含量最高,显著高于 M1CK、M1F1、M2CK、M2F1 (图 1B) ($P < 0.05$)。M2F4 的磷含量最高,为 0.28%,显著高于 M1CK、M1F1、M1F2、M2CK ($P < 0.05$) (图 1C)。

衰老叶中碳氮磷含量均具有显著差异,与对照相比分别显著提高 2.62%、13.87%、23.53%,有机碳含量和磷含量随施肥量的增加呈不断上升的趋势,氮含量随施肥量的增加呈先升高后降低的趋势 (图 1D、E、F)。M1F4 的碳含量最高,为 43.88,显著高于 M1CK、M1F1、M2CK ($P < 0.05$) (图 1D)。M1F3 的氮含量最高,显著高于 M1CK、M2CK、M2F1、M2F2 ($P < 0.05$) (图 1E)。M1F4 的磷含量最高,为 0.21%,显著高于 M1CK、M1F1、M1F2、M2CK、M2F1、M2F2、M2F3 ($P < 0.05$) (图 1F)。刈割对紫花苜蓿叶片中碳、氮含量无显著影响。

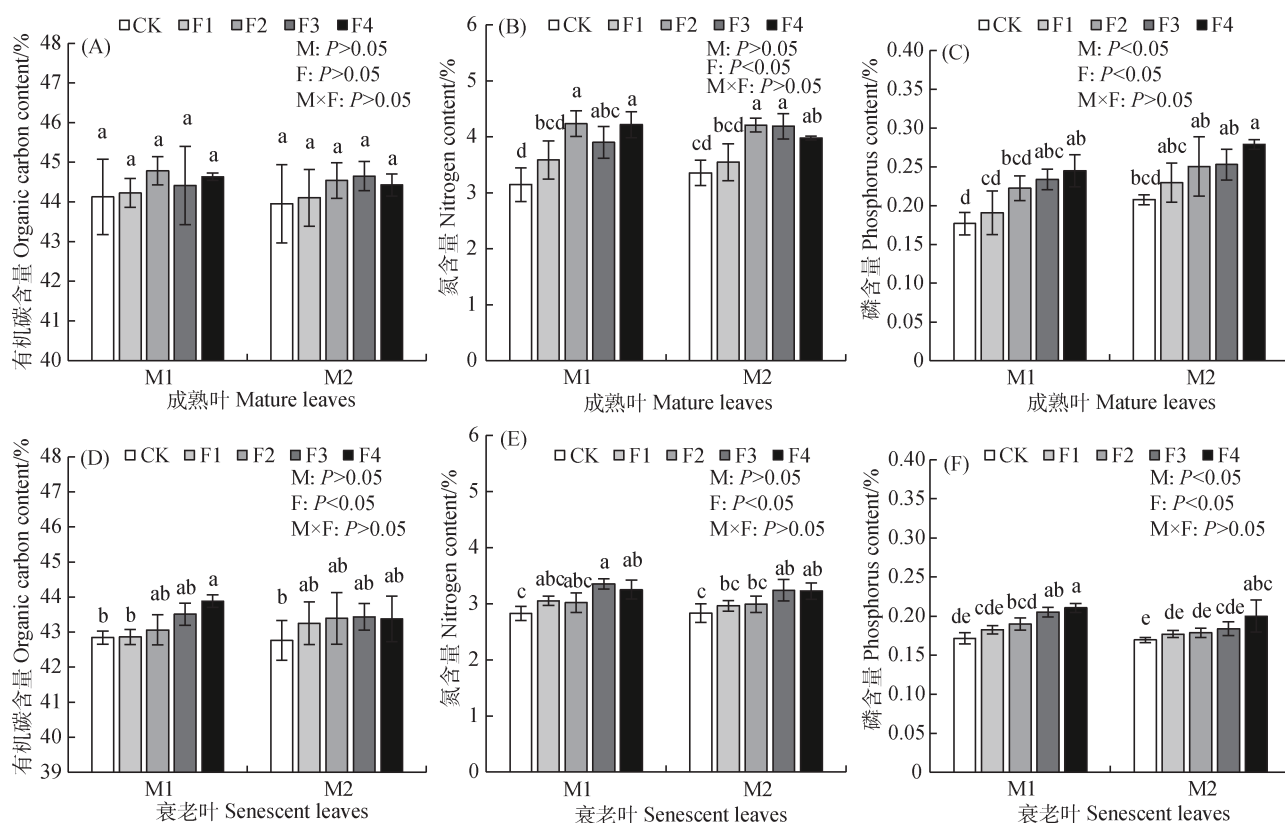


图1 刈割和施肥对紫花苜蓿叶片碳氮磷含量的影响

Fig. 1 Effects of mowing and fertilization on the carbon, nitrogen, and phosphorus content of alfalfa leaves

注:(A) (B) (C)代表成熟叶,(D) (E) (F)代表衰老叶,不同小写字母表示刈割频率和施肥交互作用下差异显著($P < 0.05$)。下同

Note: (A), (B) and (C) represent mature leaves, (D), (E) and (F) represent senescent leaves, and different lowercase letters indicate significant differences under the interaction of cutting frequency and fertilization ($P < 0.05$). The same as below

2.2 紫花苜蓿叶片的化学计量比对刈割和施肥的响应

紫花苜蓿苜蓿成熟叶中C/N随施肥量的增加呈先降低后升高的趋势,刈割M1与M2仅对成熟叶CK的C/N存在显著影响($P < 0.05$)。M2F2的C/N最低,相比M1CK, M1F2, M2CK, M2F1显著降低25.10%, 14.87%, 19.35%, 15.42% ($P < 0.05$) (图2A)。刈割和施肥对C/P存在显著影响, M1显著高于M2的C/P ($P < 0.05$), 随施肥量的增加C/P呈不断下降的趋势(图2B)。M2的N/P显著高于M1 ($P < 0.05$), 随施肥量的增加N/P呈先升高后降低的趋势(图2C)。

衰老叶中M1与M2的C/N无显著差异, 随施肥量的增加C/N整体呈下降趋势, M1F3的C/N最低, 与M1CK, M1F1, M1F2, M2CK, M2F1, M2F2存在显著差异($P < 0.05$) (图2D)。在相同施肥量下, M1F2和M2F2, M1F3和M2F3的C/P存在显著差异($P < 0.05$), M2的C/P高于M1, 随施肥量的增加C/P呈不断下降的趋势(图2E)。在相同施肥

量下, M1F3与M2F3的N/P存在显著差异($P < 0.05$), 随施肥量的增加N/P呈先升高后降低的趋势(图2F)。

2.3 紫花苜蓿叶片氮磷重吸收效率对刈割和施肥的响应

在相同刈割频率下, 氮重吸收效率随施肥量的增加呈先升高后降低的趋势, M1和M2的氮重吸收效率分别在29.06%~44.07%、33.84%~44.30%, M2F2的氮重吸收效率最高; 相同施肥量下, M2的氮重吸收效率高于M1, M1CK和M2CK, M1F4和M2F4存在显著差异($P < 0.05$) (图3A)。在相同刈割频率下, 磷重吸收效率随施肥量的增加呈先升高后下降的趋势, M2F2的磷重吸收效率最高, 为43.91%; 在相同施肥量下, M2的磷重吸收效率均显著高于M1 ($P < 0.05$) (图3B)。M1的氮磷重吸收效率的比值均大于M2, 且M2处理下的氮磷重吸收效率的比值小于1, 并说明该地区受磷限制(图3C)。

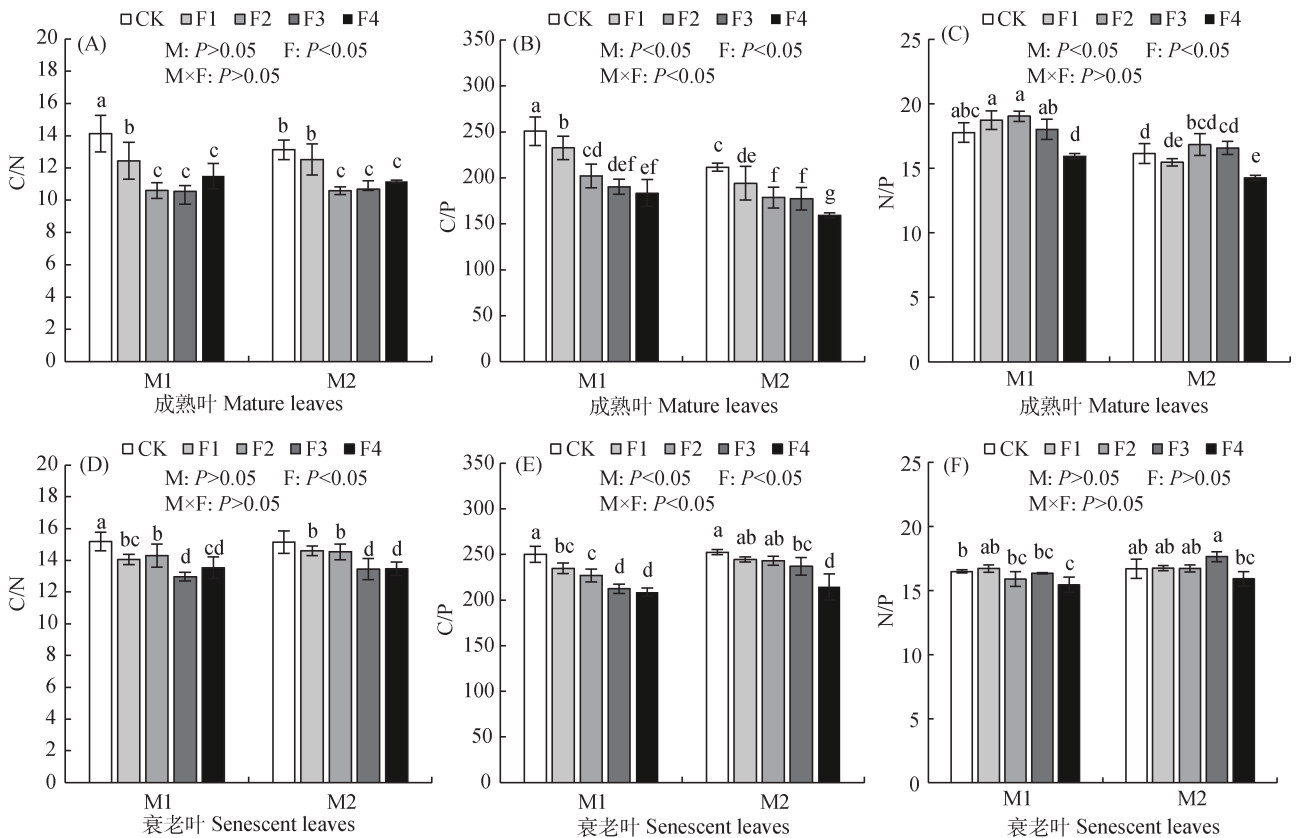


图 2 刈割和施肥对紫花苜蓿叶片化学计量比的影响

Fig. 2 Effects of mowing and fertilization on the stoichiometric ratio of alfalfa leaves

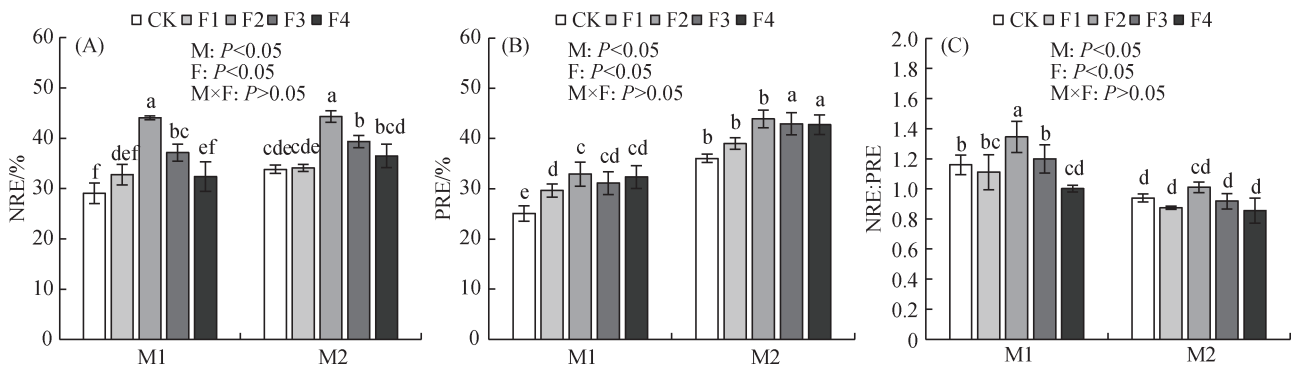


图 3 刈割和施肥对紫花苜蓿叶片氮磷重吸收效率的影响

Fig. 3 Effects of mowing and fertilization on the nitrogen and phosphorus reabsorption rate in alfalfa leaves

2.4 紫花苜蓿叶片化学计量特征的相关性分析

紫花苜蓿成熟叶和衰老叶的化学计量特征存在一定的相关性,成熟叶中氮、磷含量和衰老叶中碳、氮含量呈显著正相关,成熟叶与衰老叶的 C/N 呈显著正相关,成熟叶的氮含量与衰老叶的 C/N 呈显著负相关,成熟叶 C/N、C/P 与衰老叶碳、氮含量呈显著负相关。成熟叶碳含量与氮含量呈极显著正相关,与 C/N 呈极显著负相关。成熟叶的氮含量与磷含量呈显著正相关,与 C/N、C/P 分别呈极显

著负相关、显著负相关。成熟叶的磷含量与 C/N、N/P 呈显著负相关,与 C/P 呈极显著负相关。成熟叶的 C/N 与 C/P 呈极显著正相关。衰老叶的碳含量与氮磷含量呈极显著正相关,与 C/N、C/P 呈显著负相关。衰老叶的氮含量与磷含量呈极显著正相关,与 C/N、C/P 呈极显著负相关。衰老叶的磷含量与 C/N、C/P 呈极显著负相关,与 N/P 呈显著负相关。衰老叶 C/N 与 C/P 呈极显著正相关,衰老叶 C/P 与 N/P 呈显著正相关(表 3)。

表 3 紫花苜蓿叶片化学计量特征的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of chemical stoichiometry characteristics of alfalfa leaves

	F-C	F-N	F-P	F-C/N	F-C/P	F-N/P	O-C	O-N	O-P	O-C/N	O-C/P	O-N/P
F-C	1											
F-N	0.932**	1										
F-P	0.555	0.750*	1									
F-C/N	-0.831**	-0.931**	-0.752*	1								
F-C/P	-0.537	-0.758*	-0.991**	0.774**	1							
F-N/P	0.171	-0.044	-0.634*	-0.024	0.613	1						
O-C	0.625	0.729*	0.745*	-0.648*	-0.745*	-0.380	1					
O-N	0.600	0.662*	0.652*	-0.726*	-0.646*	-0.132	0.788**	1				
O-P	0.601	0.625	0.554	-0.606	-0.545	-0.115	0.785**	0.875**	1			
O-C/N	-0.584	-0.641*	-0.621	0.722*	0.614	0.087	-0.727*	-0.994**	-0.855**	1		
O-C/P	-0.594	-0.612	-0.548	0.607	0.533	0.096	-0.725*	-0.868**	-0.993**	0.859**	1	
O-N/P	-0.254	-0.209	-0.134	0.085	0.116	0.074	-0.315	-0.191	-0.639*	0.166	0.647*	1

注: *代表 $P<0.05$, **代表 $P<0.01$ 。下同。F 代表成熟叶, O 代表衰老叶

Note: *Represents $P<0.05$, ** represents $P<0.01$. The same as below. F represents mature leaves, O represents senescent leaves

2.5 紫花苜蓿叶片氮磷重吸收效率与刈割和施肥的关系

由图4可知, M1与M2的氮重吸收效率与施肥水平的非线性拟合方程分别为 $y=-3.5161x^2+11.94x+31.509$, $y=-4.2188x^2+12.207x+32.687$, 施肥水平在1~1.5之间, M1和M2的氮重吸收出现交点, 施肥水平在1~1.5之前, 随施肥水平的增加M2的氮素重吸收效率高于M1。M1与M2的磷重吸收效率与施肥水平的非线性拟合方程分别为 $y=-3.3769x^2+9.9465x+25.335$

$9.9465x+25.335$ 、 $y=-3.4647x^2+10.422x+35.716$, 随施肥水平的增加M2的磷重吸收效率高于M1。

2.6 紫花苜蓿叶片氮磷重吸收效率与碳氮磷的相关性

由表4可知, 紫花苜蓿叶片碳氮磷含量与氮磷重吸收效率有显著相关性, 成熟叶的碳氮含量与氮重吸收效率存在显著正相关关系, 成熟叶的磷含量与磷重吸收效率存在极显著正相关性关系, 衰老叶的碳氮磷含量与氮磷重吸收效率无显著相关性。

表 4 紫花苜蓿叶片氮磷重吸收效率与碳氮磷含量的相关性分析

Table 4 Correlation analysis between nitrogen and phosphorus reabsorption rate and carbon, nitrogen, and phosphorus content in alfalfa leaves

指标 Index	成熟叶 Mature leaves			衰老叶 Senescent leaves		
	C	N	P	C	N	P
氮重吸收效率 NRE	0.674*	0.745*	0.513	0.221	0.204	0.101
磷重吸收效率 PRE	0.258	0.504	0.804**	0.347	0.203	-0.026

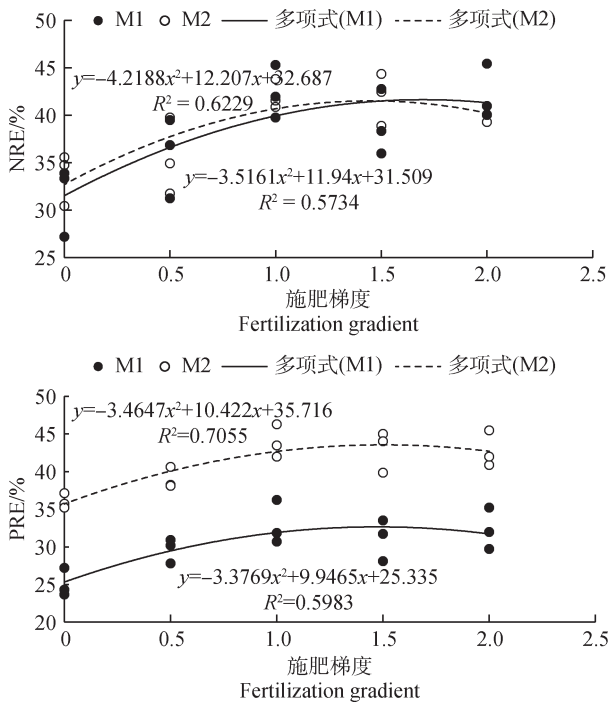


图 4 紫花苜蓿叶片氮磷重吸收效率与施肥水平的相关性
Fig. 4 Correlation between nitrogen and phosphorus reabsorption rate of alfalfa leaves and fertilization level

3 讨论

3.1 紫花苜蓿叶片的碳、氮、磷含量对刈割和施肥的响应

刈割通过改变植物对能量和养分的获取能够显著影响植物的多个生理过程^[21], 进而对植物体的养分状况和元素平衡产生影响^[22], 多数研究表明刈割会导致植物体内因营养元素的再分配, 导致植物体内碳、氮、磷含量的变化^[23-24]。董敬超等^[25]研究表明随着刈割频次的增加, 羊草 C 浓度逐渐降低, N、

P 浓度逐渐升高。张璐璐等^[26]研究表明豆科植物 N、P 含量均不受刈割干扰的影响。本研究中,在不同的刈割频率处理下显著提高了紫花苜蓿叶片中的磷含量,对其碳氮含量无显著差异,这可能是由于刈割利用下,植物存在补偿生长促进植物组织更新,加速了植物从土壤中的养分吸收^[27],而紫花苜蓿作为喜磷植物加快了磷养分吸收速率^[28]。同时,刈割导致根际渗出液增加,促进根际微生物活动,最终导致土壤供给植物的可利用养分增加,从而使植物群落的化学计量学改变^[29]。

不同施用量配施下肥效的持续性可间接影响植物碳氮磷化学计量^[30-32]。植物叶片为了维持养分的化学计量平衡,倾向于通过调节自身组织的 N 含量和 P 含量^[33]。本研究中,施肥显著提高叶片中的氮磷含量,随施肥量的增加其氮含量呈先升高后下降的趋势,成熟叶和衰老叶氮含量分别在 F3、F4 处理出现拐点,可能是紫花苜蓿本身作为固氮植物生长过程对氮素需求存在一定的阈值^[34],若过量施肥造成盐胁迫可能会减缓叶片的养分吸收效率^[35]。磷含量呈不断升高的趋势,其原因可能是该地区土壤磷素及其匮乏,而 P 的添加增加了表土全磷含量^[36],同时豆科植物固氮所消耗的能量加剧了其对磷的需求,从而促进了植物叶片对磷的吸收。成熟叶与衰老叶的养分含量变化趋势相同,但其浓度存在差异。因为在植物凋落叶片脱落前,叶片的 C 浓度变化不大^[37],而 N、P 被重吸收利用,导致凋落叶片 N、P 浓度相比成熟叶片明显降低。

刈割和施肥的协同作用下对紫花苜蓿叶片碳氮磷含量无显著影响,刈割和施肥对叶片养分吸收可能存在非线性或阈值效应。紫花苜蓿作为多年生牧草,刈割后,植株优先将养分和能量分配给根系或茎基,以支持再生和越冬^[38],施肥则可能更多促进地下部发育^[39],导致两者的协同作用对地上叶片养分含量的直接影响有限。

3.2 紫花苜蓿叶片的化学计量比对刈割和施肥的响应

植物体内元素计量特征能够反映植物的生存策略,植物地上部组织的 C/N 和 C/P 反映了植物在吸收营养元素时对 C 的同化能力与植物 N 和 P 的利用策略^[40]。C 是植物体主要组成元素,具有相对稳定性,N、P 浓度才是衡量 C/N 和 C/P 的关键,并且较低的比值对应较高的生长速率^[41]。刈割提高了

豆科植物的氮含量,进而提高了其氮磷比,降低了碳氮比^[42],而在一定范围内磷肥施用量对紫花苜蓿 C/P 和 N/P 也有显著影响,且高钾处理的头茬苜蓿 P 含量显著增加,C/P 和 N/P 明显下降^[43]。本研究中在刈割和施肥处理下成熟叶和衰老叶的 C/N 先降低后升高,C/P 一直下降且施肥水平越高下降趋势越显著,这是在刈割和施肥的交互作用下,氮磷含量升高,因为施肥引起土壤中有效 N、P 供应增加,刈割后植物为了加快生长,从土壤中吸收更多 N、P 素,打破叶片化学计量的内稳性使叶片的碳氮比、碳磷比下降,同时也降低植物的 C 同化能力。

植物叶片的 N/P 值指示着植物生长的养分限制状况,目前较多采用 Koerselman 等^[44]提出的 N/P 阈值来指示土壤养分状况,即当 $N/P < 14$ 时为 N 限制;当 $14 < N/P < 16$ 时,植物同时受 N、P 两种元素共同限制; $N/P > 16$ 时为 P 限制。本研究中紫花苜蓿叶片中的一小部分处理 N/P 介于 14 和 16 之间,大部分处理 N/P 大于 16,说明该地区受磷限制较为严重,磷素是紫花苜蓿生长的首要养分限制性因子,因此,合理施用磷肥对紫花苜蓿生长具有重要意义。

3.3 紫花苜蓿叶片的氮磷重吸收效率对刈割和施肥的响应

紫花苜蓿叶片氮磷重吸收效率在刈割和施肥的交互作用下显著提高,这是因为养分输入引起植物生长对 N、P 的需求超过了土壤的供应,存在一定的氮磷限制,故而导致其 NRE、PRE 增大^[45];另一方面是相同施肥量下年刈割 4 次比年刈割 3 次消耗土壤的养分含量更高,为保障植物的正常生长,多次刈割会提高植物内部的养分吸收,增加 NRE、PRE。有研究表明植物在高频刈割下通过改变养分分配策略促进重吸收^[46],本研究与其一致。刈割可促进养分向根系转运,提高越冬期根冠养分(N、P)储备^[47],翌年头茬叶片可通过分解根系储存的蛋白质、核酸等物质,实现较高的 N、P 重吸收效率。这是因为高频刈割改变植物生长周期刺激养分循环效率,从而加快养分的重吸收来适应养分流失的重要策略,或频繁刈割使老叶碳同化能力下降,碳饥饿加速衰老,从而促进氮磷的主动回收^[48]。

NRE、PRE 的提高表示了紫花苜蓿在该区域存在 N、P 共同限制,这是由于本研究的紫花苜蓿正处于高速生长期,对 N、P 需求量均较大而土壤的养分

含量无法满足,施肥可增加土壤有效养分含量缓解养分限制,进而提高植物氮、磷含量^[30],同时通过调节酶活性影响氮、磷的重吸收速率^[49]。而大部分研究表明施肥抑制重吸收效率,因土壤养分充足减少内部回收,本研究结果与其不同,可能因紫花苜蓿正处在旺盛生长期,施肥加快植物生长速率,导致组织中氮磷浓度被生物量“稀释”,为维持新生组织的氮磷浓度通过提高氮磷重吸收效率来补充^[50],或是钾肥增强了植物体内养分的转运^[51]。NRE先升高后降低,是因为施肥量过大导致成熟叶片富营养化而减少主动吸收。PRE不断升高,则是衰老叶片达到一定生长周期后开始促进其中磷脂的分解,释放P供再利用^[52]。

植物自身养分重吸收与其从土壤获取养分是一个平衡的过程,这个平衡取决于两个过程的相对能量消耗程度,根据养分经济假说可知,当植物随着养分供应的增加,植物会采用成本相对更低的策略从土壤中获得养分^[53]。土壤养分受氮磷限制,因施肥得以缓解,而高梯度施肥植物会降低氮磷重吸收,加强外界养分的吸收保持植物正常生长代谢水平。

3.4 紫花苜蓿叶片化学计量特征的相关性

成熟叶与衰老叶的化学计量存在显著相关关系,一方面是因为植物通过“源-库”理论将有限养分优先供给新生组织,成熟叶作为“库”吸收更多N、P以维持高生长速率^[54],本研究中成熟叶中的氮磷含量与衰老叶的碳氮含量呈显著正相关,表明老叶从“光合源”逐渐转变为“养分储备源”,其化学计量特征变化表明叶片养分的利用情况。另一方面是因为不同生长阶段造成的,生长初期叶片的碳氮磷化学计量差异较小,养分分配以生长为主;生长旺盛期植物叶片的代谢速率加快促进养分的体内循环;到达生殖生长阶段,叶片衰老加速,为避免养分的流失,提高氮磷重吸收效率,使衰老叶片的氮磷含量降低,因C滞留增加进而C/N、C/P升高,与成熟叶的氮磷含量呈显著负相关^[55]。

本研究中紫花苜蓿处于生长生理向生殖生长转变的阶段,成熟叶的氮磷含量与衰老叶的C/N、C/P呈负相关但不显著。成熟叶和衰老叶的N、P含量均与其C/N、C/P呈显著负相关,这是因为成熟叶处于快速生长期需要大量的N(合成蛋白、叶绿素)和P(合成核酸、ATP)^[56],而衰老叶中的蛋白质

和核酸开始降解产生大量的氮磷物质^[52],因此氮磷含量升高,进而降低C/N、C/P。当衰老叶中N、P转移越高,残留的N、P含量越低,致使C/N和C/P随之升高。

3.5 紫花苜蓿叶片氮磷重吸收效率的相关性

氮磷重吸收效率的高低受外界因素影响诸多,其中物种差异和生境的不同可能是造成差异的主要原因。本研究中主要从刈割和施肥管理措施进行分析,施肥可能促进了苜蓿对养分的主动回收能力来适应高养分条件,避免养分过剩导致的代谢负担^[57]。这也可能是一种储备策略,植物在高养分条件下储存更多养分,以应对未来可能的养分限制。本研究中施肥水平与氮磷重吸收效率存在正相关关系,养分重吸收效率与施肥的正相关仅在一定的施肥水平内成立,过量的施肥可能导致重吸收效率下降(如因根系受损或生理紊乱)。有研究表明^[58]施用磷肥可显著提高叶片的氮重吸收效率,这是因为磷素是植物代谢和能量转移的关键元素,其供应充足能优化氮素的吸收和再利用机制。杨梅^[59]研究表明施肥条件下的氮磷重吸收受水分供给影响较大,本试验还需要从水分控制进一步研究,因为水分不足会抵消施肥的潜在效益。本研究中M2的磷重吸收效率高于M1,表明多次刈割显著促进磷重吸收效率,激发磷素重吸收机制提升紫花苜蓿的再生能力,而刈割对叶片氮重吸收无显著差异,是因为紫花苜蓿作为固氮植物可利用氮素较高,减少了氮的重吸收。

氮磷重吸收效率与成熟叶的氮磷含量呈显著正相关,表明养分重吸收效率随成熟叶养分储备增加而增强,这与段兵红等^[60]研究一致。同时也表明植物倾向于优先回收相对匮乏的元素以维持碳氮磷的化学计量平衡。成熟叶中较高的N、P含量与衰老叶的氮磷重吸收效率,代表了植物的资源获取策略。

4 结论

刈割和施肥对紫花苜蓿成熟叶-衰老叶C、N、P化学计量特征和叶片氮磷重吸收效率有一定的影响,且其影响程度随着施肥水平发生显著改变。成熟叶叶-衰老叶C、N、P化学计量特征之间关系密切,存在显著的相关性。刈割和施肥提高了紫花苜

苜蓿的氮磷重吸收效率,表明人为干预下紫花苜蓿存在更为有效的氮磷利用策略。通过叶片化学计量比和养分重吸收可知,该地区存在氮磷限制。刈割和施肥的协同作用促进氮磷重吸收,成熟叶的碳氮含量和衰老叶的氮磷重吸收效率在M2F2最高,且提高了养分资源利用效率。

参考文献

- [1] CHERNEY H J, SMITH R S, SHEAFFER C C, et al. Nutritive value and yield of reduced-lignin alfalfa cultivars in monoculture and in binary mixtures with perennial grass [J]. *Agronomy Journal*, 2020, 112(1): 352-367
- [2] ONYEONAGU C C. Effects of cutting frequency and nitrogen fertilizer application on yield, proportion of crop fractions and leaf to stem ratio in guinea grass (*Panicum maximum*) pasture [J]. *African Journal of Agricultural Research*, 2012, 7(19): 3022-3032
- [3] 胡华锋,介晓磊,郭孝,等. 氮磷钾及微量元素与有机肥配施对紫花苜蓿饲草产量及品质的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2010, 41(1): 98-101
HU H F, JIE X L, GUO X, etc The effect of combined application of nitrogen, phosphorus, potassium, trace elements and organic fertilizers on the yield and quality of alfalfa forage [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2010, 41(1): 98-101
- [4] ZHANG Y, MAI H, QIU Q, et al. The responses of C, N, P and stoichiometric ratios to biochar and vermicompost additions differ from alfalfa and a mine soil [J]. *Agriculture*, 2023, 13(10): 1-13
- [5] FANG Z, LI D D, JIAO F, et al. The latitudinal patterns of leaf and soil C:N:P stoichiometry in the loess plateau of China [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019(10): 85
- [6] WANG K, ZHANG R, SONG L, et al. Comparison of C:N:P stoichiometry in the plant-litter-soil system between poplar and elm plantations in the Horqin Sandy Land, China [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 655517
- [7] LV X T, HAN X G. Nutrient resorption responses to water and nitrogen amendment in semi-arid grassland of Inner Mongolia, China [J]. *Plant and Soil*, 2010, 327(1): 481-491
- [8] HOU S, LV X, YIN J, et al. The relative contributions of intra- and inter-specific variation in driving community stoichiometric responses to nitrogen deposition and mowing in a grassland [J]. *Science of the Total Environment*, 2019(666): 887-893
- [9] 王佳智. 刈割和氮磷添加对内蒙古典型草原植物功能性状的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2023: 44-45
WANG J Z. The effects of cutting and nitrogen phosphorus addition on functional traits of typical grassland plants in Inner Mongolia [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2023: 44-45
- [10] LI L, LI X, LIU B, et al. Imbalanced stoichiometric patterns in foliar nutrient resorption response to N and P addition in grazing alpine grassland [J]. *Acta Oecologica*, 2020, 102(000): 7
- [11] 李冰月,南丽丽,温素军,等. 刈割强度对不同根型苜蓿营养器官化学计量特征的影响. *中国草地学报*, 2022, 44(1): 114-120
LI B Y, NAN L L, WEN S J, et al. Effects of cutting intensity on the chemometric characteristics of nutrient organs in different root types of alfalfa. *Chinese Journal of Grassland Science*, 2022, 44(1): 114-120
- [12] ZHANG T R, FRANK L, WANG H et al. The effect of defoliation time on nutrient recovery and hay production in semi-arid grassland plants [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, 14(1): 14
- [13] XT, REED, SC, 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
- [14] 陆皎云. 施氮磷肥对黄土高原不同生长阶段紫花苜蓿叶片养分重吸收的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2019: 87-88
LU J Y. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on nutrient resorption in alfalfa leaves at different growth stages on the Loess Plateau [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019: 87-88
- [15] LIU Y L, LI L, LI X Y, et al. Effect of nitrogen and phosphorus addition on leaf nutrient concentrations and nutrient resorption efficiency of two dominant alpine grass species [J]. *Journal of Arid Land*, 2021, 13(10): 1041-1053
- [16] 巩皓,杨柳,李丹丹,等. 寒地黑土农区紫花苜蓿生产与品质对施肥和刈割频次的响应及效益分析[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(13): 2657-2667
GONG H, YANG L, LI D, et al. Response and benefit analysis of alfalfa production and quality to fertilization and cutting frequency in cropland of cold black soil regions [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(13): 2657-2667
- [17] 王志鹏. 科尔沁沙地磷添加对紫花苜蓿生产性能、碳氮磷储量及土壤化学计量特征的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古民族大学, 2024: 6-7
WANG Z P. Effects of phosphorus addition in horqin sandy land on alfalfa production performance, carbon, nitrogen and phosphorus reserves and soil stoichiometric characteristics [D]. Hohhot: Inner Mongolia University for Nationalities, 2024: 6-7
- [18] LIU Y, LI M X, XU J S, et al. Physiological and metabolomics analyses of young and old leaves from wild and cultivated soybean seedlings under low-nitrogen conditions. [J]. *BMC plant biology*, 2019, 19(1): 389
- [19] 鲍士旦. 土壤农业与分析[M]. 第3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 263-270
BAO S D. Soil chemical analysis. [M]. 3rd edition. Beijing: China agricultural press, 2000: 263-270
- [20] YUAN Z Y, CHEN H Y H. Negative effects of fertilization on plant nutrient resorption [J]. *Ecology*, 2015, 96(2): 373-380
- [21] COLLINS S L, KNAPP A K, BRIGGS J M, et al. Modulation of diversity by grazing and mowing in native tallgrass prairie [J]. *Science*, 1998, 280: 745-747

- [22] KITCHEN D J, BLAIR J M, CALLAHAM M A. Annual fire and mowing alter biomass, depth distribution, and C and N content of roots and soil in tallgrass prairie[J]. Plant and Soil, 2009, 323:235-247
- [23] ASSENG S, HSIAO T C. Canopy CO₂ assimilation, energy balance, and water use efficiency of an alfalfa crop before and after cutting[J]. Field Crops Research, 2000, 67(3):191-206
- [24] MEURIOT F, AVICE J C, SIMON J C, et al. Influence of initial organic n reserves and residual leaf area on growth, N Uptake, N Partitioning and N Storage in alfalfa (*Medicago sativa*) during post-cutting regrowth [J]. Annals of Botany, 2004(2):311-321
- [25] 董敬超,孙继军. 不同频次刈割对羊草碳、氮、磷化学计量特征的影响. 北方园艺, 2017(18):126-130
DONG J C, SUN J J. Effects of different cutting frequencies on the stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen, and phosphorus in *Leymus chinensis*. Northern Horticulture, 2017 (18): 126-130
- [26] 张璐璐,李艳,王孝安,等. 刈割与施肥对高寒草甸土壤和植物 N、P 化学计量学特征的影响[J]. 西北植物学报, 2017, 37 (11):2256-2264
ZHANG L L, LI Y, WANG X A, et al. Effects of mowing and fertilization on the N and P stoichiometric characteristics of soil and plants in alpine meadows [J]. Acta Botanica Sinica, 2017, 37(11): 2256-2264
- [27] GUO M, GUO T, ZHOU J, et al. Restored legume acts as a “nurse” to facilitate plant compensatory growth and biomass production in mown grasslands[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2024, 44(6):60-60
- [28] MA H M, YU X Q, YU Q, et al. Maize/alfalfa intercropping enhances yield and phosphorus acquisition [J]. Field Crops Research, 2023(303):109136
- [29] HAMITON I E W, FRANK D A. Can plants stimulate soil microbes and their own nutrient supply? Evidence from a grazing tolerant grass[J]. Ecology, 2001, 82(9):2397-2402
- [30] LV 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):301-10
- [31] LU J, LIU M, YANG M, et al. Leaf resorption and stoichiometry of N and P of 1, 2 and 3 year-old lucerne under one-time P fertilization[J]. Soil & Tillage Research, 2020(197): 104481
- [32] HE H, ZHANG Z K, Su R, et al. Amending aeolian sandy soil in the Mu Us Sandy Land of China with Pisha sandstone and increasing phosphorus supply were more effective than increasing water supply for improving plant growth and phosphorus and nitrogen nutrition of lucerne (*Medicago sativa*) [J]. Crop and Pasture Science, 2020, 71(8):785-793
- [33] AGREN I G. Stoichiometry and nutrition of plant growth in natural communities [J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2008, 39(2008):153-170
- [34] WANG Y, LI M, GUO J, et al. Alfalfa (*Medicago sativa* L.) nitrogen utilization, yield and quality respond to nitrogen application level with center pivot fertigation system [J]. Agronomy, 2023, 14(1):48
- [35] HE F, WANG G L, WANG L X, et al. Effects of organic base fertilizer and inorganic topdressing on alfalfa productivity and the soil bacterial community in saline soil of the Huanghe River Delta in China[J]. Agronomy, 2022, 12(11):2811
- [36] HAN B, HE Y, ZHOU J, et al. Non-linear responses of the plant phosphorus pool and soil available phosphorus to short-term nitrogen addition in an alpine meadow [J]. Journal of Integrative Agriculture (JIA), 2025, 24(3):815-826
- [37] 王振南,赵梅,杨燕,等. 苜蓿叶片氮、磷和钾养分重吸收与化学计量比的偶联关系[J]. 草业学报, 2019, 28(11):177-183
WANG Z N, ZHAO M, YANG Y, et al. Coupling relationship between nutrient resorption of nitrogen, phosphorus, and potassium in alfalfa leaves and their stoichiometric ratios [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(11): 177-183
- [38] TEEIXEIRA I E, MOOT J D, BROWN E H. Defoliation frequency and season affected radiation use efficiency and dry matter partitioning to roots of lucerne (*Medicago sativa* L.) crops [J]. European Journal of Agronomy, 2007, 28 (2) : 103-111
- [39] WANG Y, XIE J, FAN F, et al. Phosphorus fertilization enhanced overwintering, root system and forage yield of late-seeded alfalfa in sodic soils[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 18090
- [40] SUN L, ZHANG B, WANG B, et al. Leaf elemental stoichiometry of *Tamarix* Lour. species in relation to geographic, climatic, soil, and genetic components in China [J]. Ecological Engineering, 2017, 106:448-457
- [41] BAI Y F, WU J G, CLARK C M, et al. Grazing alters ecosystem functioning and C:N:P stoichiometry of grasslands along a regional precipitation gradient[J]. Journal of Applied Ecology, 2012, 49: 1204-1215
- [42] 陈安群,轩娟,王冬,等. 施肥与刈割对内蒙古草地生态化学计量特征的影响[J]. 广西植物, 2020, 40(11):1575-1583
CHEN A Q, XUAN J, WANG D, et al. Effects of fertilization and mowing on the ecological stoichiometric characteristics of grasslands in Inner Mongolia [J]. Guangxi Botany, 2020, 40 (11): 1575-1583
- [43] 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. Response of ecological stoichiometric characteristics of legume-grass mixture pasture to fertilization and mixture ratio [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 28(5): 1386-1394
- [44] KOERSELMAN, WILLEM, MEULEMAN, et al. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation. [J]. Journal of Applied Ecology, 1996, 33:1441-1450
- [45] 周云若,钟全林,邹宇星,等. 氮磷添加对不同林分类型刨花楠鲜叶-凋落叶-土壤碳氮磷化学计量特征的影响[J]. 生态学

- 杂志, 2025, 44(9): 2826-2836
- ZHOU Y R, ZHONG Q L, ZOU Y X, et al. The effect of nitrogen and phosphorus addition on the stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen, and phosphorus in fresh leaves, wilted leaves, and soil of different forest types of Chinese fir [J]. *Journal of Ecology*, 2025, 44(9): 2826-2836
- [46] YANG Z, MINGGAGUD H, BAOYIN T, et al. Plant production decreases whereas nutrients concentration increases in response to the decrease of mowing stubble height [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 253(C): 109745
- [47] 陈卫东, 张玉霞, 张庆昕, 等. 末次刈割时间对苜蓿根颈抗氧化系统及抗寒性的影响 [J]. *草业学报*, 2022, 31(9): 129-138
- CHEN W D, ZHANG Y X, ZHANG Q X, et al. Effect of the last cutting time on the antioxidant system and cold resistance of alfalfa root neck [J]. *Journal of Grass Industry*, 2022, 31(9): 129-138
- [48] LEI P, ZHANG Z, AN X, et al. HLS1 interacts with ATG8 to negatively regulate the ABS3-mediated plant senescence pathway. [J]. *Cell reports*, 2025, 44(4): 115507
- [49] YANG M, LU Y, MU L, et al. Leaf and soil phosphatases and the correlations with leaf P resorption of lucerne under P fertilization and irrigation [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2022, 23(1): 842-853
- [50] LEI L, BO L, GAO X P, et al. Nitrogen and phosphorus addition differentially affect plant ecological stoichiometry in desert grassland. [J]. *Scientific reports*, 2019, 9(1): 18673
- [51] LLOWERAS J, FERRAN J, BOIXADERA J, et al. Potassium fertilization effects on alfalfa in a mediterranean climate [J]. *Agronomy Journal*, 2001, 93(1): 139-143
- [52] YANG B, TAN Z, YAN J, et al. Phospholipase-mediated phosphate recycling during plant leaf senescence [J]. *Genome Biology*, 2024, 25(1): 199-199
- [53] WRIGHT J I, WESTOBY M. Nutrient concentration, resorption and lifespan: leaf traits of australian sclerophyll species [J]. *Functional Ecology*, 2003, 17(1): 10-19
- [54] CHAPIN F S, MOILANEN L. Nutritional controls over nitrogen and phosphorus resorption from Alaskan Birch leaves [J]. *Ecology*, 1991, 72(2): 709-715
- [55] LU J Y, YANG M, LIU M G, et al. Leaf stoichiometry and resorption of N and P in lucerne at different growth stages under different water supplies [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2019, 42(5): 501-511
- [56] TIAN D, YAN Z, SCHMID B, et al. Environmental versus phylogenetic controls on leaf nitrogen and phosphorous concentrations in vascular plants [J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 5343
- [57] 孙艳, 洪婉婷, 韩阳, 等. 植物内部磷循环利用提高磷效率的研究进展 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(12): 2216-2228
- SUN Y, HONG W B T, HAN Y, et al. Research progress on improving phosphorus efficiency through internal phosphorus recycling in plants [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2021, 27(12): 2216-2228
- [58] 陆姣云, 段兵红, 杨梅, 等. 植物叶片氮磷养分重吸收规律及其调控机制研究进展 [J]. *草业学报*, 2018, 27(4): 178-188
- LU J Y, DUAN B H, YANG M, et al. Research progress on the reabsorption patterns and regulatory mechanisms of nitrogen and phosphorus nutrients in plant leaves [J]. *Journal of Grassland Industry*, 2018, 27(4): 178-188
- [59] 杨梅. 控水和施磷钾肥下陇东苜蓿叶性状响应及磷酸酶调控叶片P重吸收的机制研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2020: 99-100
- YANG M. Study on the response of leaf traits and the mechanism of phosphatase regulation of leaf P reabsorption in Longdong alfalfa under water control and phosphorus and potassium fertilizer application [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020: 99-100
- [60] 段兵红, 陆姣云, 刘敏国, 等. 陇东雨养农区紫花苜蓿叶片氮、磷、钾重吸收与生物固氮的偶联关系 [J]. *草业学报*, 2016, 25(12): 76-83
- DUAN B H, LU J Y, LIU M G, et al. The coupling relationship between nitrogen, phosphorus, potassium reabsorption and biological nitrogen fixation in alfalfa leaves in the rain fed agricultural area of Longdong [J]. *Journal of Grassland Industry*, 2016, 25(12): 76-83

(责任编辑 彭露茜)