

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.03.019

引用格式:王晓丽,王倩,徐航,等.磷添加对早熟禾叶片化学计量特征和养分重吸收效率的影响[J].草地学报,2026,34(3):949—959

WANG Xiao-li, WANG Qian, XU Hang, et al. Effects of Phosphorus Addition on Stoichiometric Traits and Nutrient Resorption Efficiency in Bluegrass Leaves[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(3):949—959

磷添加对早熟禾叶片化学计量特征和养分重吸收效率的影响

王晓丽^{1,2}, 王倩¹, 徐航^{1,2}, 何克燕^{1,2}, 王佳豪³, 宋美琪^{1,2}, 金玲^{1,2}, 魏小星^{1,2*}

(1. 青海大学, 青海 西宁 810016; 2. 青海省青藏高原优质牧草种质资源利用重点实验室/青海大学畜牧兽医科学院, 青海 西宁 810016; 3. 中国农业科学院草原研究所, 内蒙古 呼和浩特 010010)

摘要:本研究以青海扁茎早熟禾(*Poa pratensis* var. Qinghai)为研究对象,探究在6个磷(P)添加水平下(30, 45, 60, 75, 90, 105 kg·hm⁻², 依次标记为P₁, P₂, P₃, P₄, P₅, P₆),其叶片的化学计量比和养分重吸收效率的变化趋势。结果表明:(1)叶片碳(C)、氮(N)、磷(P)含量普遍呈现枯黄期<完熟期<乳熟期,且在P₃水平下叶片养分含量累积最高;(2)叶片C/N和C/P普遍呈现枯黄期>完熟期>乳熟期,N/P普遍呈现完熟期>乳熟期>枯黄期;(3)叶片氮重吸收效率(Nitrogen reabsorption efficiency, NRE)在CK处理下最高,磷重吸收效率(Phosphorus reabsorption efficiency, PRE)在P₂添加下最高;(4)叶片NRE与化学计量比普遍呈正相关关系,PRE与成熟叶片化学计量比普遍呈负相关关系,与凋落叶片化学计量比普遍呈正相关关系。本研究认为适宜的P添加量为P₂-P₃(45~60 kg·hm⁻²)。本研究为高寒区人工草地的精准施肥与科学管理提供了实践性指导。

关键词:‘青海’扁茎早熟禾;磷添加;生长时期;生态化学计量;养分重吸收

中图分类号:S544.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)03-0949-11

Effects of Phosphorus Addition on Stoichiometric Traits and Nutrient Resorption Efficiency in Bluegrass Leaves

WANG Xiao-li^{1,2}, WANG Qian¹, XU Hang^{1,2}, HE Ke-yan^{1,2}, WANG Jia-hao³, SONG Mei-qi^{1,2}, JIN Ling^{1,2}, WEI Xiao-xing^{1,2*}

(1. Qinghai University, Xining, Qinghai Province 810016, China; 2. Qinghai University/Key Laboratory of Superior Forage Germplasm in the Qinghai-Tibetan Plateau, The Academy of Animal and Veterinary Science, Xining, Qinghai Province 810016, China; 3. Grassland Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hohhot, Inner Mongolia 010010, China)

Abstract: In this study, *Poa pratensis* var. Qinghai was used as the research subject. The changing trends in leaf stoichiometric ratios and nutrient resorption efficiency under six phosphorus (P) addition levels (30, 45, 60, 75, 90, and 105 kg·hm⁻², sequentially labeled as P₁, P₂, P₃, P₄, P₅, and P₆) were investigated. The results indicated: (1) The leaf carbon (C), nitrogen (N), and P contents generally exhibited the pattern of senescent stage < full ripeness stage < milky ripeness stage, with the highest accumulation of leaf nutrient contents observed under the P₃ level. (2) Leaf C/N and C/P ratios generally followed the pattern of senescent stage > full ripeness stage > milky ripeness stage, while the N/P ratio generally showed full ripeness stage > milky ripeness stage > senescent stage. (3) The Nitrogen Reabsorption Efficiency (NRE) was the highest under the CK (control, no P addition) treatment, whereas the Phosphorus Reabsorption Efficiency (PRE) was the highest under the P₂ addition level. (4) A generally positive correlation was observed between leaf NRE

收稿日期:2025-04-22;修回日期:2025-05-27

基金项目:青海省基础 Research 计划(2023-ZJ-942J);青海省高端创新人才计划(2024-LJ87)资助

作者简介:王晓丽(1997-),女,汉族,山西沁水人,博士,主要从事青藏高原抗逆草种质资源创新与利用研究,E-mail: 1640765149@qq.com;

*通信作者 Author for correspondence, E-mail: wuiko@163.com

and stoichiometric ratios, while PRE exhibited a generally negative correlation with stoichiometric ratios in mature leaves and a generally positive correlation with stoichiometric ratios in litter leaves. This study suggests that the appropriate P addition amount is P_2-P_3 ($45\sim60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$). This research provides practical guidance for precision fertilization and scientific management of artificial grasslands in alpine regions.

Key words: *Poa pratensis* var. Qinghai; Phosphorus addition; Phenological stages; Ecological stoichiometry; Nutrient reabsorption efficiency

植物叶片的碳(C)、氮(N)、磷(P)含量和化学计量比在维持植物生长、代谢以及适应环境方面起着重要作用^[1]。C元素主要来源于植物光合作用对 CO_2 的固定^[2],N元素参与了叶片的形成、茎与根的生长等过程,P元素对维持细胞内能量代谢具有重要意义^[3]。叶片的C/N和C/P代表着植物吸收营养元素时对C的同化能力,同时也反映植物对营养的利用率^[4];N/P可以反映植物自身的营养限制情况^[5]。植物叶片C,N,P含量及其比值的变化,能够反映植物养分利用状况和对环境的适应能力^[6],有助于了解植物营养供求关系及其循环机制^[7]。叶片中N元素和P元素来源于根系从土壤中的吸收,或者来自植物自身的养分储存^[8]。植物叶片在枯萎的过程中,会将养分物质不断转运至其他器官和组织中,这个过程被称作叶片的养分重吸收^[9]。植物叶片的养分重吸收能力一般用重吸收效率来表示^[10]。叶片养分重吸收效率越高意味着能转移到繁殖体以及植物根部的养分越多,降低了植物生长对土壤基质的依赖度,可促进多年生植物养分储备和对生境胁迫的抵抗力,保证来年的返青及生长^[11-12]。

外源养分的添加能改变植物体内各器官的元素积累^[13],进而影响植物体内的化学计量比和养分重吸收效率^[14]。P是一种影响草地植物生产力和生态系统功能的重要养分^[15],作为植物能量载体的主要组成成分和提供者^[16],对植物生长发育和新陈代谢起着非常重要的作用,是植物生长的主要限制因子之一^[17]。土壤中有有机P库占土壤总磷的20%~80%,但它们主要以植物不可利用的形式存在,而无机P库只有极少部分能被植物吸收利用,致使土壤中95%以上的P为无效形式^[18]。研究表明,外部P输入会改变其在土壤中的有效性^[19],提高土壤中的P含量,促使植物体内N和P含量升高,有助于提高牧草产量和抗逆性^[20-21],而高水平的P添加通常会改变植物根系的生理状态和土壤微生物群落结构,从而影响植物对其他养分的吸收^[22]。许丽颖等^[13]研究表明,随着施P量的增加,植物叶片N,P,K含量显著增加,叶片N/K和叶N/P显著降低。张燕^[23]研究表明,施P显著降低植物叶片NRE,PRE

呈先升高后降低趋势。植物的生长发育节律与其有机体对环境养分的吸收、转化及分配存在密切关联^[24]。植物在不同生长期对养分的需求存在明显差异^[25],会根据其对环境适应形成一定的生长特征和元素的分配规律^[26]。罗艳等^[27]研究表明,不同生长期玉米(*Zea mays*)叶片的C和N含量在拔节期最高,P含量在乳熟期最高,成熟期玉米叶的C/N显著高于其他生育期,乳熟期叶片的N/P显著低于其他生育期。陆姣云^[28]研究表明,紫花苜蓿(*Medicago sativa*)随生长期延长,叶片养分重吸收降低,NRE与PRE均表现为现蕾期显著高于初花期。植物养分重吸收在叶片衰老前启动,通常在落叶前2~4周开始^[29]。Estiarte等^[30]研究发现,植物叶片在衰老过程中,养分重吸收效率表现出先升高后降低的趋势,且PRE下降幅度通常大于NRE下降幅度。郭文^[31]研究表明,在叶片衰老过程中不同树种的养分重吸收效率随着叶片衰老程度的加深,养分重吸收效率会逐渐下降。而P添加条件下植物养分重吸收效率在叶片衰老过程中的变化趋势目前尚不明确。

青海扁茎早熟禾(*Poa pratensis* Qinghai)是一种典型的禾本科根茎繁殖型牧草^[32],其抗逆性强,适应性广,根茎繁殖快,固土保水能力强,被作为青藏高原高寒地区草地恢复及水土保持的重要草种^[33]。而青藏高原海拔高,气温低,土壤中的可利用磷含量普遍较低,近年来随着N沉降的持续增加,土壤持续酸化,有效P与铁、铝等金属离子结合,进一步加剧了土壤中有效P的缺乏^[34]。而P添加对青藏高原禾草的影响主要表现为促进地下根系的生长,从而促进根系吸收土壤养分的能力^[35]。因此,本研究以青海扁茎早熟禾为研究对象,探讨在不同P添加条件下,青海扁茎早熟禾逐渐出现枯黄叶片时至凋落前的化学计量比及养分重吸收效率的变化趋势及叶片化学计量比和重吸收效率两者之间的相互关系,旨在阐明P添加对青海扁茎早熟禾的养分循环利用过程和规律,为科学评估高寒生态区植物养分需求和养分供应状况提供重要理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于青海省海北州西海镇国家牧草种质资源圃(36°49'29" N, 101°45'26" E), 其海拔高度为3156 m。试验站全年平均无霜期93 d, 年均温度0.5℃, 年均降水量375 mm, 主要集中在7—9月, 年均蒸发量1400 mm, 年均日照时数2980 h。土壤为栗钙土, pH值8.43, 有机质32.48 g·kg⁻¹, 全氮含量2.86 g·kg⁻¹, 全磷含量1.26 g·kg⁻¹, 速效氮含量81.33 mg·kg⁻¹, 速效磷含量1.89 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

选取2016年建植(建植第5年)的扁茎早熟禾试验田(建植时施有机肥4.50 kg·hm⁻², 行距30 cm, 条播, 建植后每年田间管理仅人工除杂草, 无施肥处理)。根据青藏高原海北地区前人的P添加试验量设置施P量^[21-36], 试验设置6个P添加水平(P₂O₅, 12%), 分别为30, 45, 60, 75, 90, 105 kg·hm⁻², 依次标记为P₁, P₂, P₃, P₄, P₅, P₆, 未添加P处理为对照(CK), 共7个处理, 每个处理设置3个重复, 总计21个小区, 小区面积3 m×9 m, 小区间隔0.3 m, 保护行行宽为1 m。2019年7月1日(青海扁茎早熟禾处于开花期), 将过磷酸钙(含P₂O₅, 12%)人工均匀撒施于试验小区。

1.3 试验方法

在各试验小区内随机选取50 cm×50 cm样区, 于7月30日乳熟期(青海扁茎早熟禾生殖枝上开始逐渐出现枯黄的凋落叶)、8月20日完熟期、9月10日枯黄期在每个样区随机选取10个长势一致的植株进行样品采集。将形态完整、大小相似、颜色相近且未泛黄的叶片作为成熟叶, 将自然衰老、颜色灰黄、尚未完全从植株脱落的叶片作为凋落叶。采集的叶片通过105℃杀青处理, 65℃烘干至恒重称, 将称重后的叶片研磨成粉过0.3 mm筛后, 进行C, N, P含量测定, 其中C含量用总碳分析仪(Elab-TOC)进行测定, N含量和P含量用流动分析仪(SEAL-Analytical-AA3)进行测定^[37]。

1.4 叶片养分重吸收效率计算

叶片的N养分重吸收效率(Nitrogen reabsorption efficiency, NRE)计算公式^[38]:

$$NRE = \frac{(N_m - N_s)}{N_m} \times 100\%$$

叶片的P养分重吸收效率(Phosphorus reabsorption efficiency, PRE)计算公式^[38]:

$$PRE = \frac{(P_m - P_s)}{P_m} \times 100\%$$

式中: NRE为叶片N的重吸收效率; N_m 为成熟叶N的含量(mg·g⁻¹); N_s 为凋落叶N的含量(mg·g⁻¹); PRE为叶片P的重吸收效率; P_m 为成熟叶片P的含量(mg·g⁻¹); P_s 为凋落叶片P的含量(mg·g⁻¹)。

1.5 数据处理

利用SAS 9.4数据分析软件, 采用双因素方差分析(用LSD法在0.05水平上进行有交互的双因素方差分析)检验时期、P添加、时期与P添加交互效应对成熟叶和凋落叶C, N, P含量及化学计量、叶片N, P重吸收效率的差异显著性($P < 0.05$)。用R Studio 2023.03.1.446软件(Hmisc包, Corplot包)进行叶片C, N, P, C/N, C/P, N/P和NRE, PRE的相关性拟合分析, 利用Origin 2021软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 磷添加对早熟禾叶片C, N, P含量的影响

生长时期和P添加的互作效应与两种叶片C, N, P含量均呈极显著正相关($P < 0.001$)(图1a-f)。生长时期与两种叶片C, N, P含量均呈极显著负相关($P < 0.01$)(图1a-f), 在不同生长时期, 相同处理下两种叶片C, N, P含量普遍呈现枯黄期<完熟期<乳熟期。在同一生长时期, 两种叶片C, N, P含量随P添加, 均呈现先升高后降低的变化趋势。成熟叶片C含量在P₄处理下最高(图1a), N和P含量在P₃处理下最高(图1b, c); 凋落叶片C和P含量在P₃处理下最高(图1d, f), 乳熟期和完熟期凋落叶N含量在P₂处理下最高(图1e), 枯黄期凋落叶N含量在P₃处理下最高(图1e)。

2.2 磷添加对早熟禾叶片C/N, C/P和N/P的影响

生长时期与两种叶片C/N, C/P和N/P均呈极显著差异($P < 0.01$)(图2a-f), 在不同生长时期, 相同P添加处理下两种叶片C/N和C/P普遍呈现枯黄期>完熟期>乳熟期; N/P在P₃处理下呈枯黄期>完熟期>乳熟期, 其余处理普遍呈现完熟期>乳熟期>枯黄期(图2a-f)。成熟叶片C/N在各时期

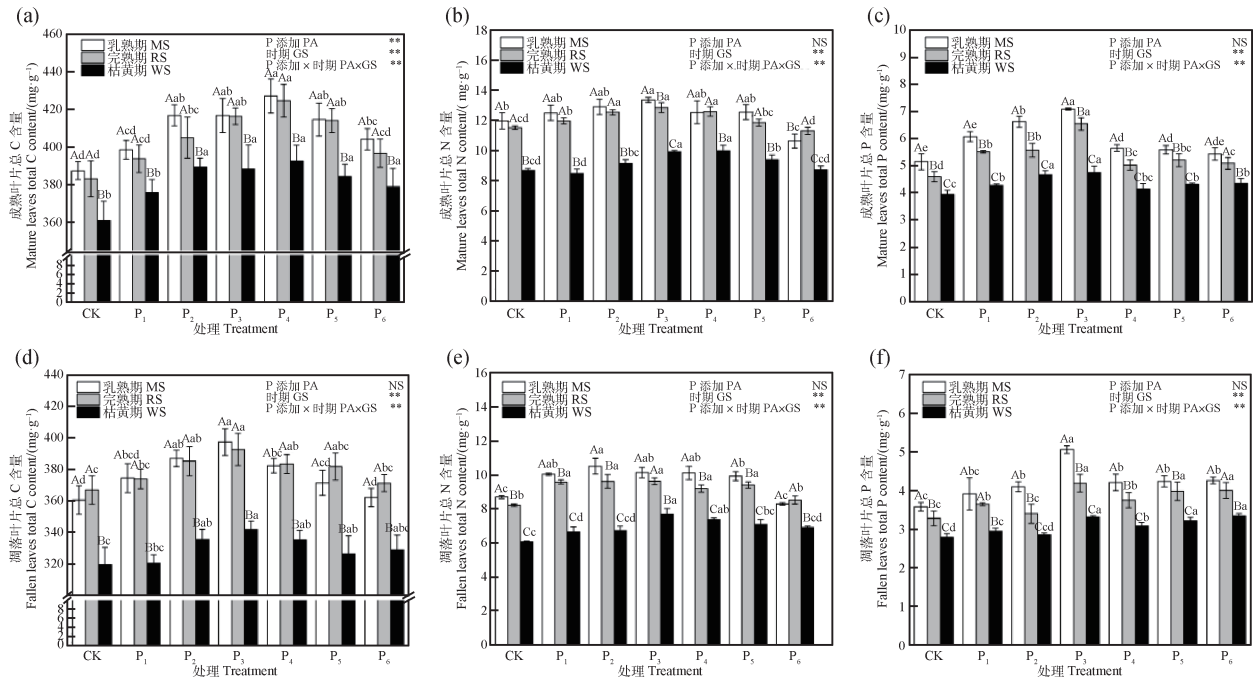


图1 磷添加对成熟叶片和凋落叶片C,N,P含量的影响

Fig. 1 Effects of phosphorus addition on C, N and P contents of mature leaves and fallen leaves

注:CK为不施磷对照;P₁,P₂,P₃,P₄,P₅,P₆分别表示施磷水平为30,45,60,75,90,105 kg·hm⁻²;MS为乳熟期,RS为完熟期,WS为枯黄期,PA为磷添加,GS为生长期;不同大写字母表示时期间差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示不同施磷处理间差异显著($P<0.05$)。NS表示显著不差异($P>0.05$);*差异显著($P<0.05$);**极显著差异($P<0.01$),下同

Note: CK is the control without phosphorus application; P₁, P₂, P₃, P₄, P₅, and P₆ represent phosphorus application levels of 30, 45, 60, 75, 90, and 105 kg·hm⁻², respectively; MS is the Milking stage, RS is the Ripe stage, WS is the Withering stage; PA denotes phosphorus addition, and GS the growth stage. Different lowercase letters indicate significant differences among phosphorus treatments ($P<0.05$). NS indicates no significant difference ($P>0.05$); * indicates a significant difference ($0.01<P<0.05$); ** indicates a highly significant difference ($P<0.01$ or $P<0.001$), the same as below

随P添加与CK均无显著性差异(图2a);C/P乳熟期和与C/N变化一致,完熟期在P₄-P₆处理下与CK无显著性差异,其余处理低于CK枯黄期在P₂和P₃处理下低于CK,其余P添加处理与CK无显著性差异(图2b);N/P乳熟期在P₁和P₅处理下,与CK无显著性差异,其余P添加处理下均低于CK,完熟期在P₄处理下与CK无显著性差异,其余P添加处理均低于CK,枯黄期在P₄处理下高于CK(图2c)。凋落叶片C/N乳熟期在P₆处理下高于CK,其余P添加处理均低于CK,完熟期在P₆处理下与CK无显著性差异,其余P添加处理均低于CK,枯黄期在P₂处理下与CK无显著性差异,其余P添加处理均低于CK(图2d);C/P乳熟期在P₁,P₂和P₄处理下,与CK无显著性差异,其余P添加处理均低于CK,完熟期在P₂处理下与CK无显著性差异,其余P添加处理均低于CK(图2e);N/P乳熟期在P₃和P₆处理下低于CK,其余P添加处理与CK无显著性差异,完熟期在P₂处理下高于CK,枯黄期在P₄处理下高于CK(图2f)。

2.3 磷添加对早熟禾叶片养分重吸收效率的影响

生长期和P添加的互作效应与NRE呈显著正相关($P<0.05$),与PRE无显著性差异。叶片NRE在P₂与P₄处理下乳熟期最低,在其他处理下各时期叶片NRE无显著性差异(图3a)。叶片PRE在P₃处理下完熟期显著高于乳熟期和枯黄期,其他处理下各时期均无显著性差异(图3b)。同一生长期,叶片NRE随P添加均呈现先降低后增加再降低的变化趋势,在乳熟期,叶片NRE在P₃处理下与CK无显著性差异,在完熟期,叶片NRE在P₄处理下与CK无显著性差异,在枯黄期,叶片NRE在P₂,P₄和P₅处理下与CK无显著性差异,其余P添加处理下叶片NRE均低于CK(图3a);叶片PRE呈现先增加后降低的变化趋势,在乳熟期和枯黄期,叶片PRE在P₂处理下高于CK,在完熟期,叶片PRE在P₁-P₃处理下高于CK(图3b)。

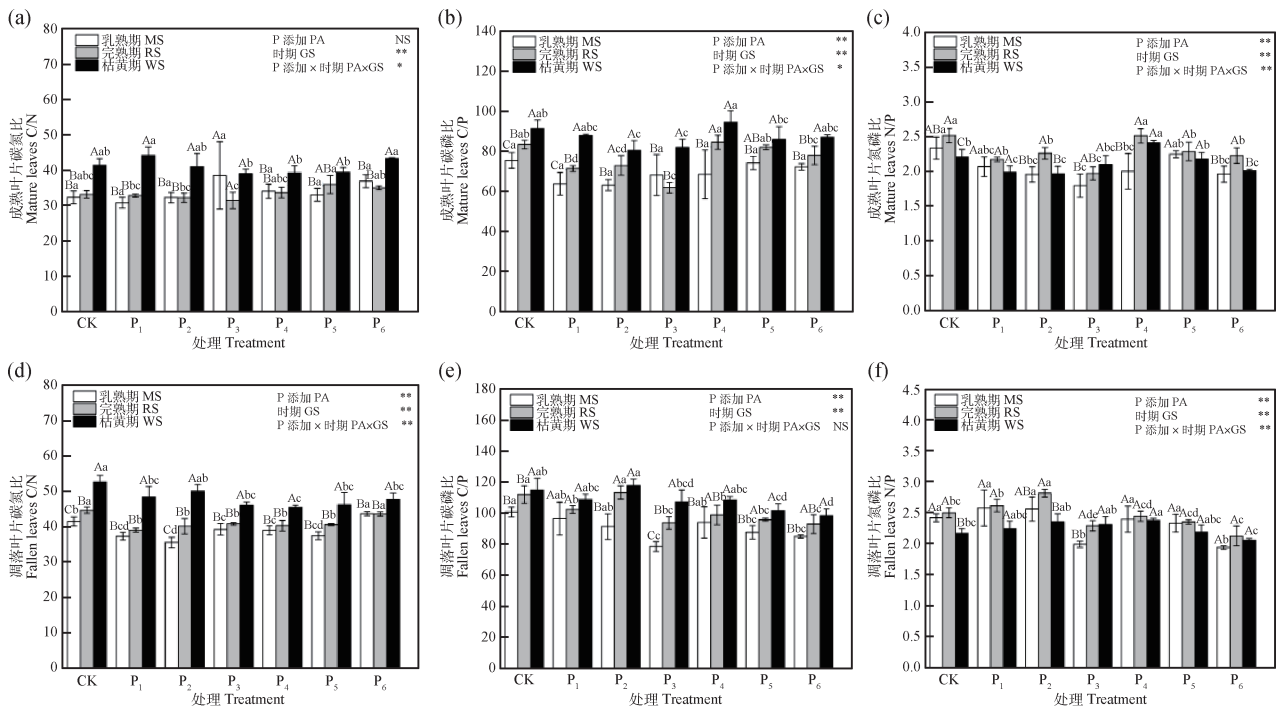


图2 磷添加对成熟叶片和凋落叶片C/N, C/P和N/P的影响

Fig. 2 Effects of phosphorus addition on C/N, C/P and N/P of mature leaves and fallen leaves

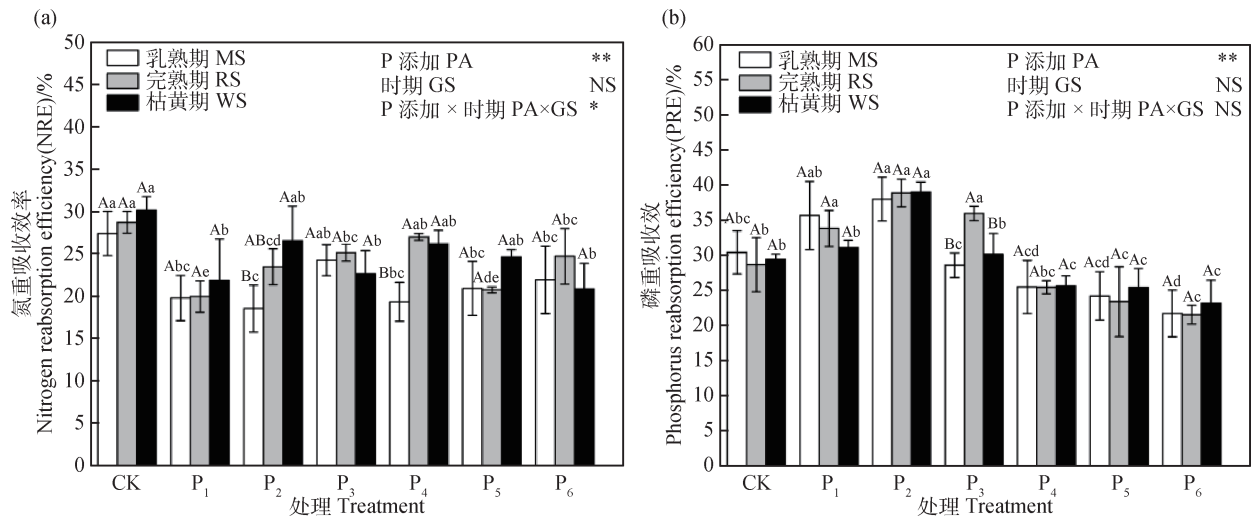


图3 磷添加对叶片N,P重吸收效率的影响

Fig. 3 Effects of phosphorus addition on leaf N and P resorption efficiency

2.4 早熟禾叶片养分重吸收效率与叶片C,N,P含量及化学计量比的相关性

通过对青海扁茎早熟禾叶片氮磷养分重吸收效率与成熟叶片和枯黄叶片总C,N,P含量和化学计量比进行回归分析,得出相关回归方程(图4-5)。结果表明,NRE与成熟叶片C含量呈负相关($P < 0.05$)(图4a),与成熟叶片P含量呈极显著负相关($P < 0.01$)(图4c),与成熟叶片C/P和N/P呈极显著正相关($P < 0.01$)(图4e,f)。NRE与凋落叶片

C,N,P含量均呈极显著负相关($P < 0.01$)(图4a,b,c),与凋落叶片C/N和C/P呈极显著正相关($P < 0.01$)(图4d,e)。

PRE与成熟叶片P含量呈极显著正相关($P < 0.01$)(图5c),与成熟叶片C/P呈极显著负相关($P < 0.01$)(图5e),与成熟叶片N/P呈显著负相关($P < 0.05$)(图5f)。PRE与凋落叶片P含量呈极显著负相关($P < 0.01$)(图5c),与凋落叶片C/P,N/P呈极显著正相关($P < 0.01$)(图5e,f)。

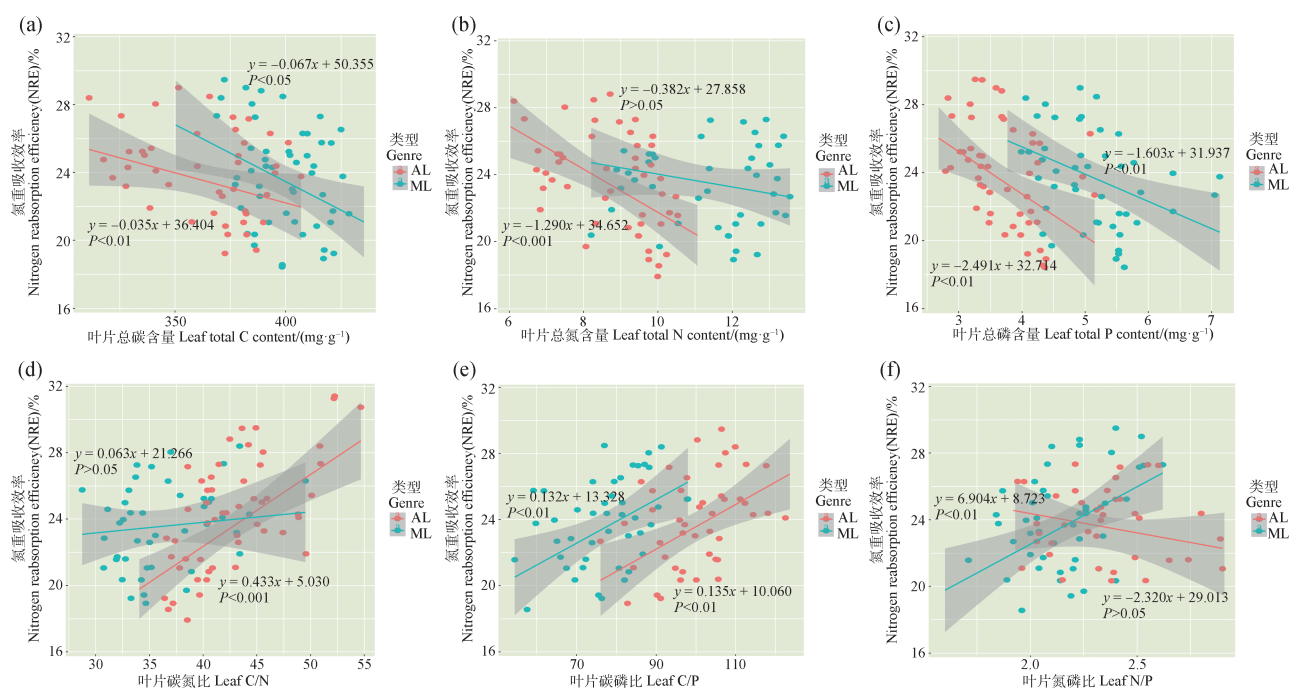


图 4 叶片 C、N、P 含量及化学计量特征与氮重吸收效率的相关性拟合

Fig. 4 Correlation analysis of leaf C:N:P stoichiometry with nitrogen reabsorption efficiency

注:图中方格内散点图表示各指标之间的相关密切程度;公式为回归方程;AL为凋落叶片,ML为成熟叶片。 $P>0.05$ 为无显著差异, $0.01<P<0.05$ 为显著差异, $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 为极显著差异。下同

Note: The data in the upper panel of the figure indicate the correlation among the indicators; The formula is the regression equation; AL is the fallen leaves, ML is the mature leaves. $P>0.05$ indicates no significant difference, $0.01<P<0.05$ indicates a significant difference, and $P<0.01$ or $P<0.001$ indicates a highly significant difference. The same as below

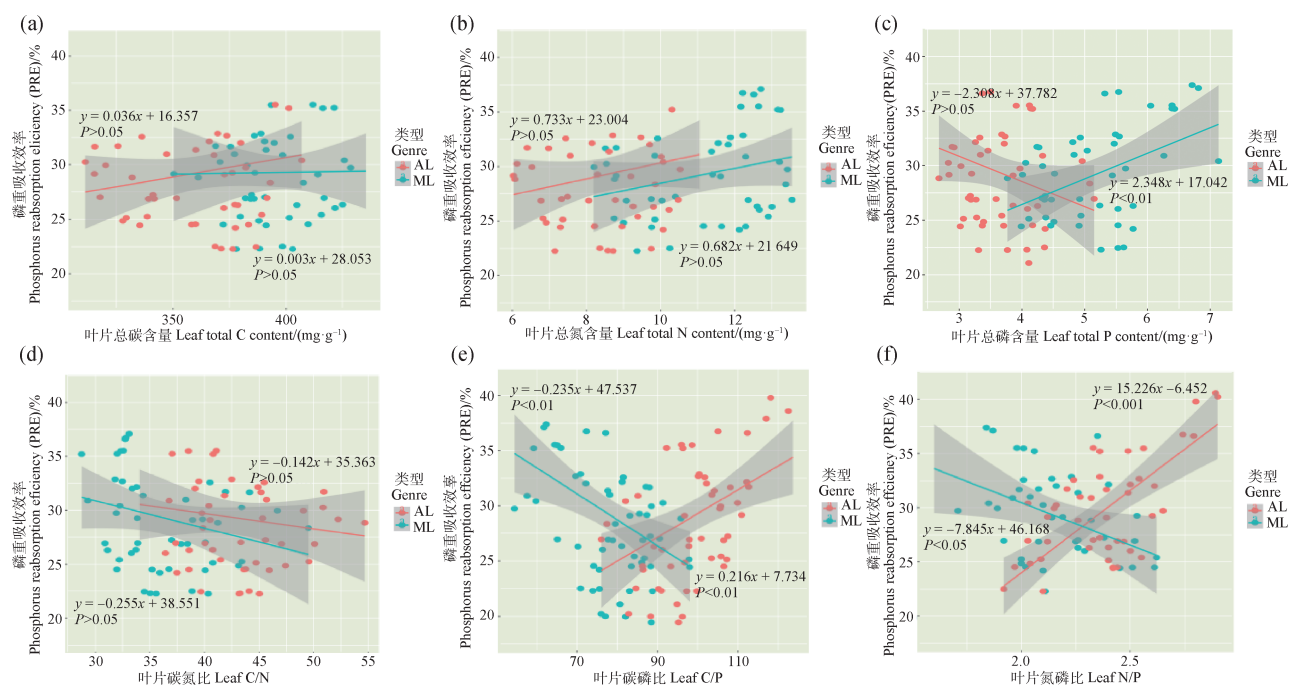


图 5 叶片 C、N、P 含量及化学计量比与磷重吸收效率的相关性拟合

Fig. 5 Correlation analysis of leaf C:N:P stoichiometry with phosphorus reabsorption efficiency

3 讨论

3.1 叶片养分含量及其化学计量特征对磷添加的响应

本研究发现,早熟禾成熟叶与凋落叶C、N、P含量随P添加,均呈现先升高后降低的变化趋势,成熟叶片C含量在P₄处理下最高,N和P含量在P₃处理下最高,凋落叶片C、P含量在P₃处理下最高(图1a-f)。吕娜等^[39]研究表明,施P可显著提升草甸草原群落C、N、P含量。王佳豪等^[21]研究表明,施P量增加,青海扁茎早熟禾各器官C、N、P含量呈先增加后降低的变化趋势。本研究结果与吕娜等^[39]研究结果出现差异,这是由于本研究P添加含量与其相比要高且研究对象和研究区域均存在差异,此外,过量的P添加会影响植物体内微量元素的正常代谢,导致植物的光合能力下降,光合产物降低,积累的干物质减少,叶片C、N、P含量也随之降低^[40]。植物养分含量在不同生长时期会存在一定差异^[41]。本研究中,两种叶片C、N、P含量普遍呈现枯黄期<完熟期<乳熟期,且C含量积累过程受生长时期的影响较小,稳定性较强,而N和P含量的积累受时期影响较大(图1a,b,c),这与周浪敏等^[24]的研究相符。Reich等^[42]通过验证叶片养分含量与植物生长策略之间的相关性,指出衰老叶片中C、N、P含量的降低是植物适应环境的普遍策略。C作为植物生命体中的骨架,是植物生长发育和生理生化过程中的能量来源,稳定性强,受影响程度较小^[43],N和P作为植物体内的功能性物质,在植物生长过程中其含量变化受环境影响较明显,植物在生长发育后期需要消耗大量N和P合成具有遗传作用的蛋白质^[44]。

植物C/N、C/P表示其消耗单位N和P而同化C的能力,反映了植物对N和P养分的利用效率与固C效率^[45]。本研究中早熟禾成熟叶片的C/P与凋落叶片的C/P和C/N值总体呈下降趋势(图2b,d,e),表明P添加促进了早熟禾对磷的吸收效率,从而降低了C/P值^[46],而C/N值下降可能是因为P添加可以促进植物根系的生长和发育,从而增加了植物对土壤中氮素的吸收面积^[47]。植物在生长发育过程中能根据自身生长发育所需自主调节养分比例,导致体内C、N、P化学计量比发生变化^[48]。本研究发现,叶片C/N和C/P普遍呈现枯黄期>完熟期>乳熟期(图2),本研究结果与牛得草等^[49]的研究结果相符。此现象可能是由于叶片在生长发育前

期累积了大量碳水化合物,从乳熟期至枯黄期,早熟禾叶片N和P含量受到“稀释”作用不断下降,导致叶片C/N和C/P随生长时期推移表现出上升趋势^[50],表明早熟禾叶片C/N和C/P动态变化主要由N和P含量主导。植物叶片N/P可判断植物的养分限制情况^[51]。当N/P<14时,植物生长主要受N元素限制;当N/P>16时,植物主要受P元素限制;当14<N/P<16时,植物生长受N元素和P元素的共同限制或者不受养分限制^[52]。本研究中,成熟叶片N/P值范围在1.80~2.51区间,凋落叶片N/P值范围在1.95~2.82区间(图2c,f),表明青海扁茎早熟禾在该地区的生长主要受N元素的限制。此外,两种叶片N/P在P₃处理下呈枯黄期>完熟期>乳熟期,其他处理下N/P普遍呈现完熟期>乳熟期>枯黄期(图2c,f),表明P添加可能会促进植物对P的吸收和利用效率,使不同生育阶段的N/P发生变化,在完熟期,植物可能通过增加P的吸收来优化繁殖投入,从而导致N/P相对较高,而在乳熟期和枯黄期,随着植物对P的需求减少或P的再分配降低,植物体内P含量累积,N/P逐渐下降^[53]。

3.2 叶片养分重吸收效率对磷添加的响应

在植物的整个生长阶段中,不同生长时期对养分的需求有所差异,对养分的敏感程度和吸收能力也不尽相同,因此会表现出不同的养分重吸收特征^[28]。对于植物整个生命进程而言,养分重吸收在不同阶段的差异主要是由叶片的变化引起的^[54]。本研究中,相同P添加处理下,叶片NRE和PRE在各期间普遍无显著性差异(图3a,b)。本研究表明早熟禾叶片开始枯黄时至之后的40天内其养分重吸收效率基本保持一致。Zhang等^[55]发现,叶片在衰老初期质量损失较低,养分流失较少,重吸收效率较高。陆姣云等^[56]表明,叶片滞留时间越长,其养分利用效率越高,但生长后期叶片结构高度降解,细胞膜破裂,养分重吸收效率逐渐降低。本研究结果与前人研究不符,一方面可能与植物生理策略、环境条件和物种特性等有关,另一方面本研究时间段主要聚焦于植物出现枯黄叶片至凋落前,而前人研究主要聚焦于植物的整个生长阶段。当植物所在环境的养分条件发生变化时,相应的植物对该元素的重吸收率就会降低^[57]。本研究中,叶片NRE随P添加均呈先降低后增加再降低的趋势,各施P梯度下的叶片NRE呈现与CK无显著性差异或

低于CK(图3a)。叶片NRE降低可能是因为施P增加P积累的同时,植株为维持其内稳性增加对N的积累,从而使叶片从土壤吸收更多N,降低了植株对其自身养分循环的依赖性。叶片PRE随P添加呈先增加后降低的趋势,在 P_2 处理下,各时期叶片PRE均达到最高(图3b),表明在 P_1 与 P_2 处理下可能促进植物对P的吸收利用效率,增强叶片中P的回收能力,使PRE增加,而随着P添加含量的持续增加,植物逐步达到P吸收的饱和点,导致PRE不再增加甚至降低^[58]。当P素达到一定阈值时,植物对P素的吸收不再随施P量的增加而提高,过高的P素反而会抑制植物的生长^[23]。本研究结果与Chen等^[38]研究中增施P肥会降低植物N和P重吸收率的结果相一致。

3.3 叶片化学计量特征与养分重吸收效率的相关性

叶片养分含量的变化会引起养分重吸收效率及生态化学计量比的变化,从而导致养分重吸收效率和生态化学计量比产生关联性^[59]。研究发现,植物养分重吸收效率与叶片养分含量正相关^[60-61]。本研究中,两种叶片NRE与养分含量呈负相关(图4a, b, c)($P < 0.05$),PRE与成熟叶片P含量呈极显著正相关($P < 0.01$),与凋落叶片P含量呈极显著负相关($P < 0.01$)(图5c)。本研究结果与前人研究结果不符,可能原因是施P条件下植物生长不仅受N的限制,也受土壤养分、植物自身生长生理特征和外界干扰等因素的影响。养分重吸收在维持植物化学计量平衡中起着重要作用^[9]。本研究中,NRE与成熟叶片C/P和N/P呈极显著正相关($P < 0.01$)与凋落叶片C/N和C/P呈极显著正相关($P < 0.01$)(图4d-f);PRE与成熟叶片C/P呈极显著负相关($P < 0.01$),与N/P呈显著负相关($P < 0.05$),与凋落叶片C/P和N/P呈极显著正相关($P < 0.01$)(图5e, f)。王振南等^[59]认为苜蓿叶片养分重吸收效率基本与衰老叶生态化学计量比呈正相关关系,而与成熟叶生态化学计量比呈负相关关系,这与本研究结果相符。钟小瑛等^[62]认为,狗尾草叶片养分重吸收率与成熟叶、衰老叶化学计量比均主要呈正相关;魏大平等^[63]认为,植物叶片NRE与叶片C/N和N/P呈显著正相关关系,而叶片PRE与叶片C/N呈显著负相关关系。上述研究结果与本研究结果均存在差异,可能原因是植物种类、年龄、生态环境以及选

取的叶片成熟度不同。目前,关于植物养分重吸收率与化学计量比之间偶联关系的研究相对较少,相关研究多集中在分别研究植物养分重吸收率、化学计量比的特征,因此,要深入了解二者之间的偶联关系还需要进一步开展定量研究^[64]。

4 结论

适当的P添加可促进青海扁茎早熟禾体内养分含量的累积与重吸收效率的提升。叶片C, N, P累积含量在 P_3 ($60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)水平下达到最高,叶片磷重吸收效率在 P_2 ($45 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)水平下达到最高;叶片养分含量在随植物衰老过程中逐渐降低,而不同成熟时期对叶片的氮重吸收效率和磷重吸收效率影响较小。氮重吸收效率与叶片养分含量呈负相关关系,与化学计量比普遍呈正相关关系,磷重吸收效率与成熟叶片化学计量比普遍呈负相关关系,与凋落叶片化学计量比普遍呈正相关关系。本研究阐明了植物在P添加条件下不同成熟期适应环境的生态机制,为高寒地区草地生态系统精准施用肥料及制定科学修复方案提供了关键理论依据。

参考文献

- [1] NIKLAS K J, COBB E D. N, P, and C stoichiometry of *Eranthis hyemalis* (Ranunculaceae) and the allometry of plant growth[J]. American Journal of Botany, 2005, 92(8): 1256-1263
- [2] 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 Prataculturae Sinica, 2011, 20(2): 244-252
- [3] 邢浩, 乌日汗, 于红博, 等. 锡林郭勒草原植物叶片碳、氮、磷化学计量特征及其影响因子[J]. 草地学报, 2024, 32(12): 3774-3787
XING H, WU R H, YU H B, et al. Stoichiometric characteristics and influencing factors of carbon, nitrogen and phosphorus in leaves of steppe plants in xilingol[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(12): 3774-3787
- [4] HERBERT D A, WILLIAMS M, RASTETTER E B. A model analysis of N and P limitation on carbon accumulation in Amazonian secondary forest after alternate land-use abandonment[J]. Biogeochemistry, 2003, 65(1): 121-150
- [5] GÜSEWELL S. N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance[J]. New Phytologist, 2004, 164(2): 243-266

- [6] 戚德辉,温仲明,王红霞,等. 黄土丘陵区不同功能群植物碳氮磷生态化学计量特征及其对微地形的响应[J]. 生态学报, 2016,36(20):6420-6430
QI D H, WEN Z M, WANG H X, et al. Stoichiometry traits of carbon, nitrogen, and phosphorus in plants of different functional groups and their responses to micro-topographical variations in the hilly and Gully Region of the Loess Plateau, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(20):6420-6430
- [7] 刘小菊,单奇,李园园. 喀纳斯泰加林下72种植物叶片的碳、氮、磷化学计量特征[J]. 生态环境学报, 2020,29(7):1302-1309
LIU X J, SHAN Q, LI Y Y. Leaf carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry in 72 understory plants species in kanas taiga [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020,29(7):1302-1309
- [8] 陈昊轩. 太白山不同海拔植物群落叶片化学计量和养分重吸收研究[D]. 西安:西北农林科技大学, 2023:12-13
CHEN H X. Study on leaf stoichiometry and nutrient resorption of plant communities at different elevations of taibai mountain [D]. Xi'an: Northwest A&F University, 2023:12-13
- [9] BRANT A N, CHEN H Y H. Patterns and mechanisms of nutrient resorption in plants [J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2015,34(5):471-486
- [10] KILLINGBECK K T. Nutrients in senesced leaves: keys to the search for potential resorption and resorption proficiency [J]. Ecology, 1996,77(6):1716-1727
- [11] OGAWA T, OIKAWA S, HIROSE T. Nitrogen-utilization efficiency in rice: an analysis at leaf, shoot, and whole-plant level [J]. Plant and Soil, 2016,404(1):321-344
- [12] WANG Z N, LU J Y, YANG H M, et al. Resorption of nitrogen, phosphorus and potassium from leaves of lucerne stands of different ages [J]. Plant and Soil, 2014,383(1):301-312
- [13] 许丽颖,魏统超,王佳音,等. 氮、磷、钾肥对紫穗槐幼苗根叶化学计量特性的影响[J]. 森林工程, 2024,40(4):29-38
XU L Y, WEI T C, WANG J Y, et al. Effects of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers on the chemical stoichiometric characteristics of roots and leaves in seedlings of *amorpha fruticosa* [J]. Forest Engineering, 2024,40(4):29-38
- [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, 2019:23-27
LU J Y. Effects of N and P fertilizations on leaf nutrient resorption of alfalfa at different growth stages in the Loess Plateau [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019:23-27
- [15] 韩冰,耿依仪,邓艳芳,等. 氮添加对青藏高原高寒草甸土壤磷组分的影响[J]. 草地学报, 2022,30(10):2721-2728
HAN B, GENG Y Y, DENG Y F, et al. Effects of nitrogen addition on soil phosphorus fractions in an alpine meadow of Qinghai-Tibet plateau [J]. Acta Agerstia Sinica, 2022,30(10):2721-2728
- [16] 余爱,杨帆,张宇,等. 不同施磷浓度对柱花草和黑籽雀稗根系分布的影响[J]. 草业学报, 2011,20(3):219-224
YU A, YANG F, ZHANG Y, et al. Influences of different phosphorus concentrations on the root distribution of *Stylosanthes* and black seed *Paspalum* [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2011,20(3):219-224
- [17] 龙会英,张德,曾丽萍,等. 氮磷肥对3种牧草的生长效应和氮磷吸收的影响[J]. 草业学报, 2019,28(5):171-177
LONG H Y, ZHANG D, ZENG L P, et al. Herbage accumulation, and nitrogen and phosphorus absorption responses of three forage species following addition of nitrogen and phosphorus fertilizer [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019,28(5):171-177
- [18] 李立芹. 植物低磷胁迫适应机制的研究进展[J]. 生物学通报, 2011,46(2):13-16
LI L Q. Research progress on adaptive mechanism of plants under low phosphorus stress [J]. Bulletin of Biology, 2011,46(2):13-16
- [19] ZHU J X, WANG Q F, HE N P, et al. Imbalanced atmospheric nitrogen and phosphorus depositions in China: implications for nutrient limitation [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2016,121(6):1605-1616
- [20] IVERSEN C M, BRIDGHAM S D, KELLOGG L E. Scaling plant nitrogen use and uptake efficiencies in response to nutrient addition in peatlands [J]. Ecology, 2010,91(3):693-707
- [21] 王佳豪,何克燕,鲍根生,等. 磷添加对青海扁茎早熟禾各器官生物量及生态化学计量特征的影响[J]. 中国草地学报, 2024,46(1):37-46
WANG J H, HE K Y, BAO G S, et al. Effects of phosphorus addition on biomass and ecological stoichiometric characteristics of organs in *Poa pratensis* var. *anceps* gaud cv. Qinghai [J]. Chinese Journal of Grassland, 2024,46(1):37-46
- [22] 郭剑波,赵国强,贾书刚,等. 施肥对高寒草原草地质量指数及土壤性质影响的综合评价[J]. 草业学报, 2020,29(9):85-93
GUO J B, ZHAO G Q, JIA S G, et al. Comprehensive evaluation of effects of fertilization on grassland quality index and soil properties in alpine steppe [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020,29(9):85-93
- [23] 张燕. 磷添加对青海扁茎早熟禾养分重吸收的影响[D]. 西宁:青海大学, 2021:12-15
ZHANG Y. Effect of phosphorus addition on nutrient reabsorption of Kentucky bluegrass [D]. Xining: Qinghai University, 2021:12-15
- [24] 周浪敏,李长慧,土旦加,等. 玉树鹅观草主要生育期的化学计量特征[J]. 草业科学, 2024,41(7):1679-1689
ZHOU L M, LI C H, TU D J, et al. Stoichiometric characteristics of *Roegneria yushuensis* in different growth periods [J]. Prataculturae Science, 2024,41(7):1679-1689
- [25] 周喜荣,张丽萍,蒋鹏,等. 宁夏枸杞生育期干物质与氮磷钾积累动态和养分需求规律[J]. 中国土壤与肥料, 2021(1):262-272
ZHOU X R, ZHANG L P, JIANG P, et al. Dynamics of dry matter and nitrogen, phosphorus, and potassium accumulation and nutrient requirements in the growing period of *Lyceum barbarum* in Ningxia [J]. Soil and Fertilizer Science in China, 2021(1):262-272

- [26] SARDANS J, RIVAS-UBACH A, PENUELAS J. The elemental stoichiometry of aquatic and terrestrial ecosystems and its relationships with organismic lifestyle and ecosystem structure and function: a review and perspectives[J]. Biogeochemistry, 2012, 111(1): 31-39
- [27] 罗艳, 贡璐, 李杨梅. 塔里木河上游绿洲农田不同生育期玉米根茎叶生态化学计量特征[J]. 水土保持研究, 2018, 25(2): 112-119
- LUO Y, GONG L, LI Y M. Stoichiometry characteristics of root, stem and leaf of maize in different growth stages in the upper reaches of the Tarim River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(2): 112-119
- [28] 陆姣云. 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: 41-53
- LU J Y. Effects of N and P fertilizations on leaf nutrient resorption of alfalfa at different growth stages in the Loess Plateau[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019: 41-53
- [29] 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 in nitrogen and phosphorus resorption from senesced leaves and the influence of ontogenetic and environmental factors[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(4): 178-188
- [30] ESTIARTE M, CAMPIOLI M, MAYOL M, et al. Variability and limits of nitrogen and phosphorus resorption during foliar senescence[J]. Plant Communications, 2023, 4(2): 12-18
- [31] 郭文. 中亚热带主要造林树种不同生长阶段叶片养分重吸收特征[D]. 福州: 福建农林大学, 2022: 45-57
- GUO W. Leaf nutrient resorption in main afforestation tree species with different stand age in mid-subtropical China [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2022: 45-57
- [32] 史毅, 牛奎举, 余倩倩, 等. 低温对青海扁茎早熟禾活性氧代谢的影响和相关基因表达分析[J]. 草业学报, 2017, 26(12): 98-107
- SHI Y, NIU K J, YU Q Q, et al. Effect of freezing stress on ROS metabolism and cold-induced genes in *Poa pratensis* var. *Anceps* cv. Qinghai [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(12): 98-107
- [33] 周青平, 颜红波, 韩志林, 等. 高原根茎型优质草种‘青海扁茎早熟禾’的驯化选育[J]. 草地学报, 2008, 16(4): 328-335
- ZHOU Q P, YAN H B, HAN Z L, et al. Taming breeding of Rhizom-type Forage Variety *Poa pratensis* L. var. *Anceps* Gaud. cv. Qinghai in Alpine Area [J]. Acta Agrestia Sinica, 2008, 16(4): 328-335
- [34] 李文宇, 张扬建, 沈若楠, 等. 氮磷共限制青藏高原高寒草甸生态系统碳吸收[J]. 应用生态学报, 2022, 33(1): 51-58
- LI W Y, ZHANG Y J, SHEN R N, et al. Ecosystem carbon uptake was co-limited by nitrogen and phosphorus in alpine meadow on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(1): 51-58
- [35] 何克燕, 王佳豪, 张燕, 等. 青海扁茎早熟禾形态特征与生物量对磷添加的响应[J]. 草业科学, 2022, 39(11): 2414-2423
- HE K Y, WANG J H, ZHANG Y, et al. Effects of phosphorous application on the morphological characteristics and biomass yield of *Poa pratensis* var. *anceps* ‘Qinghai’ [J]. Prataculturae Science, 2022, 39(11): 2414-2423
- [36] 李颖, 林笠, 朱文琰, 等. 青藏高原高寒草地常见植物叶属性对氮、磷添加的响应[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2017, 53(3): 535-544
- LI Y, LIN L, ZHU W Y, et al. Responses of leaf traits to nitrogen and phosphorus additions across common species in an alpine grassland on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2017, 53(3): 535-544
- [37] 贝美容, 罗雪华, 杨红竹. AA3型连续流动分析仪(CFA)同时测定橡胶叶全氮、全磷、全钾的方法研究[J]. 热带作物学报, 2011, 32(7): 1258-1264
- BEI M R, LUO X H, YANG H Z. Simultaneous determination of nitrogen, phosphorus and potassium in rubber leaf samples by AA3 continuous flow analyzer (CFA) [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2011, 32(7): 1258-1264
- [38] YUAN Z Y, CHEN H Y H. Negative effects of fertilization on plant nutrient resorption [J]. Ecology, 2015, 96(2): 373-380
- [39] 吕娜, 高吉喜, 李政海, 等. 植物生长中期施肥对草甸草原群落特征与物种多样性的影响[J]. 草业学报, 2025, 34(2): 1-14
- LV N, GAO J X, LI Z T, et al. Effects of fertilizer application during mid-growing season on vegetation community biomass and species diversity in meadow grasslands [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(2): 1-14
- [40] AERTS R. Nutrient resorption from senescing leaves of perennials: are there general patterns? [J]. Journal of Ecology, 1996, 84(4): 597-608
- [41] 吴浩, 张燕, 贾志锋, 等. 青海东部农区引进燕麦品种各器官C、N、P生态化学计量学特征变化研究[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(1): 160-168
- WU H, ZHANG Y, JIA Z F, et al. C, N and P stoichiometry characteristics of oat cultivars in eastern agricultural area of Qinghai Province [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(1): 160-168
- [42] REICH P B, ELLSWORTH D S, WALTERS M B, et al. Generality of leaf trait relationships: a test across six biomes [J]. Ecology, 1999, 80(6): 1955-1969
- [43] MAO D M, MIN Y W, YU L L, et al. Effect of afforestation on microbial biomass and activity in soils of tropical China [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1992, 24(9): 865-872
- [44] SARDANS J, PENUELAS J. Drought changes nutrient sources, content and stoichiometry in the bryophyte *Hypnum cupressiforme* Hedw. growing in a Mediterranean forest [J]. Journal of Bryology, 2008, 30(1): 59-65
- [45] 胡锦涛. 刈割和养分添加对内蒙古典型草原植物生态化学计量特征的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2021: 7-18
- HU J X. Effects of mowing and nutrient addition on eco-stoichiometric characteristics of typical grassland plants in Inner

- Mongolia[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2021: 7-18
- [46] Zhang X J, Lu T Y, Sun H L, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on nutrient stoichiometry and resorption of *Fraxinus mandshurica*[J]. *Trees*, 2019(32): 383-391
- [47] LIU H, GAO X H, FAN W S, et al. Optimizing carbon and nitrogen metabolism in plants: from fundamental principles to practical applications[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2025, 67(6): 1447-1466
- [48] 张艳, 刘佳, 彭彬. 不同物候期高冰草碳氮磷含量及其化学计量特征研究[J]. *农业与技术*, 2022, 42(13): 22-25
ZHANG Y, LIU J, PENG B. Study on the contents of carbon, nitrogen and phosphorus in *Agropyron cristatum* in different phenological periods and its stoichiometric characteristics[J]. *Agriculture and Technology*, 2022, 42(13): 22-25
- [49] 牛得草, 李茜, 江世高, 等. 阿拉善荒漠区6种主要灌木植物叶片C:N:P化学计量比的季节变化[J]. *植物生态学报*, 2013, 37(4): 317-325
NIU D C, LI Q, JIANG S G, et al. Seasonal variations of leaf C:N:P stoichiometry of six shrubs in desert of China's Alxa Plateau[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(4): 317-325
- [50] 熊星烁, 蔡宏宇, 李耀琪, 等. 内蒙古典型草原植物叶片碳氮磷化学计量特征的季节动态[J]. *植物生态学报*, 2020, 44(11): 1138-1153
XIONG X S, CAI H Y, LI Y Q, et al. Seasonal dynamics of leaf C, N and P stoichiometry in plants of typical steppe in Nei Mongol, China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2020, 44(11): 1138-1153
- [51] 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): 1441-1450
- [52] TESSIER J T, RAYNAL D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2003, 40(3): 523-534
- [53] MIAO S J, QIAO Y F, LIU X B. Effect of nitrogen/phosphorus ratio on biological characteristics and organic acid exudation in soybean roots: effect of nitrogen/phosphorus ratio on biological characteristics and organic acid exudation in soybean roots[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(3): 593-596
- [54] 邓浩俊, 陈爱民, 严思维, 等. 不同林龄新银合欢重吸收率及其C:N:P化学计量特征[J]. *应用与环境生物学报*, 2015, 21(3): 522-527
DENG H J, CHEN A M, YAN S W, et al. Nutrient resorption efficiency and C:N:P stoichiometry in different ages of *Leucaena leucocephala*[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2015, 21(3): 522-527
- [55] ZHANG M X, LUO Y, MENG Q Q, et al. Correction of leaf nutrient resorption efficiency on the mass basis[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2022(6): 1125-1132
- [56] 陆皎云, 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 H B, YANG M, et al. Research progress in nitrogen and phosphorus resorption from senesced leaves and the influence of ontogenetic and environmental factors[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(4): 178-188
- [57] 张晶然. 施肥对青藏高原高寒草甸植物叶片氮磷重吸收的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2016: 47-54
ZHANG J R. Effect of fertilization on nitrogen and phosphorus reabsorption of plants in alpine meadow of Qinghai-Tibet Plateau[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016: 47-54
- [58] PENG YU L, JIAPU L, YICHENG H, et al. Response and mechanism of plant leaf nitrogen and phosphorus resorption efficiency to nutrient addition in an alpine meadow[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2024, 46(1): 93-103
- [59] 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. Relationships between alfalfa leaf nutrient resorption and stoichiometric ratios of nitrogen, phosphorus, and potassium[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(11): 177-183
- [60] CHANG Y J, LI N W, WANG W, et al. Nutrients resorption and stoichiometry characteristics of different-aged plantations of *Larix kaempferi* in the Qinling Mountains, Central China[J]. *PLoS One*, 2017, 12(12): e0189424
- [61] KOBE R K, LEPCZYK C A, IYER M. Resorption efficiency decreases with increasing green leaf nutrients in a global data set[J]. *Ecology*, 2005, 86(10): 2780-2792
- [62] 钟小瑛, 任奕炜, 衣华鹏. 狗尾草叶片N、P、K养分重吸收与化学计量比的偶联关系[J]. *植物科学学报*, 2023, 41(2): 193-203
ZHONG X Y, REN Y W, YI H P. Coupling relationship between nutrient resorption and stoichiometric ratios of N, P, and K in *Setaria viridis* (L.) Beauv. leaves[J]. *Plant Science Journal*, 2023, 41(2): 193-203
- [63] 魏大平, 张健, 张丹桔, 等. 不同林冠郁闭度马尾松(*Pinus massoniana*)叶片养分再吸收率及其化学计量特征[J]. *应用与环境生物学报*, 2017, 23(3): 560-569
WEI D P, ZHANG J, ZHANG D J, et al. Leaf carbon, nitrogen, and phosphorus resorption and the stoichiometry in *Pinus massoniana* plantations with various canopy densities[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2017, 23(3): 560-569
- [64] 邓雪花, 喻阳华, 熊康宁, 等. 不同海拔花椒叶片凋落物养分化学计量与重吸收的关系[J]. *生态学杂志*, 2024, 43(3): 749-757
DENG X H, YU Y H, XIONG K N, et al. Relationship between leaf-litter nutrient stoichiometry and resorption of *Zanthoxylum planispinum* var. *dintanensis* at different altitudes[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(3): 749-757

(责任编辑 刘婷婷)