

基于功能性状探索磷添加下沙打旺对盐碱环境的适应策略

刘建¹, 张宇琦¹, 姜婷婷¹, 王正伟¹, 孙杰², 林广宇³, 高阳^{1*}

(1. 吉林省农业科学院(中国农业科技东北创新中心), 长春 130033; 2. 长春职业技术学院, 长春 130033; 3. 吉林省畜牧业信息中心, 长春 130100)

摘要:为探究磷添加对豆科牧草缓解盐碱胁迫的机制, 选取松嫩地区中度和重度盐碱土壤作为栽培介质, 设置5个磷添加水平(P0、P20、P40、P80、P160和P320 mg P/kg 干土), 分析沙打旺(*Astragalus adsurgens*)根/叶功能性状的响应及其对幼苗生物量的影响。结果显示: 磷添加促使沙打旺地上生物量(AGB)与根生物量(RW)重新分配, 重度盐碱处理下的沙打旺幼苗先供应根生长; 而中度盐碱处理下, 优先供应地上部分生长, 沙打旺比叶面积(SLA)、比根表面积(SRA)、比根长(SRL)、根长(RL)、根尖数(RT)随着磷添加量呈上升趋势、叶片干物质质量(LDMC)呈下降趋势, 有利于提高叶片和根系对水分和养分的获取能力。方差分解结果表明, 中度盐碱处理下沙打旺根功能性状和叶功能性状对磷添加 AGB、RW 的解釋度分别为 46.2%、37.7%, 重度盐碱下解釋度分别为 66.7%、35.7%。结合经济谱分析, 磷添加下根叶及全株表现出获取策略, 从中度到重度盐碱处理沙打旺叶片表现出保守策略, 根系表现出获取策略, 全株表现出由获取向保守策略转变。

关键词:沙打旺; 磷添加; 盐碱胁迫; 功能性状

中图分类号: S541.9

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2026)01-0082-11

Phosphorus Addition Modulates Adaptation Strategies of *Astragalus adsurgens* to Saline-Alkaline Environments: Insights from Functional Traits

LIU Jian¹, ZHANG Yuqi¹, JIANG Tingting¹, WANG Zhengwei¹, SUN Jie², LIN Guangyu³, GAO Yang^{1*}

(1. Jilin Academy of Agricultural Sciences(Northeast Agricultural Research Center of China), Changchun 130033; 2. Changchun Polytechnic, Changchun 130033; 3. Jilin Provincial Animal Husbandry Information Center, Changchun 130100, China)

Abstract: To study the mechanism by which phosphorus supplementation alleviates saline-alkali stress on leguminous forage, the moderately and heavy saline-alkali soils in the Songnen region were selected as the cultivation media. Five phosphorus supplementation levels(P0, P20, P40, P80, P160 and P320 mg P/kg dry soil) were set up to analyze the responses of the root/leaf functional traits of *Astragalus adsurgens* and their impacts on the biomass of seedlings. The results showed that, phosphorus addition induced a reallocation of aboveground biomass(AGB) and root biomass(RW) in *Astragalus adsurgens* seedlings. Under severe saline-alkali stress, seedlings prioritized root growth, whereas moderate saline-alkali stress triggered preferential allocation to aboveground organs. Key functional traits, including specific leaf area(SLA), specific root surface area(SRA), specific root length(SRL), root length(RL), and root tip number(RT), showed an increasing trend with phosphorus supplementation, while leaf dry matter content(LDMC) exhibited a decreasing trend. These adaptive adjustments enhanced the capacity of leaves and roots to acquire water and nutrients, reflecting a resource optimization strategy to counteract saline-alkali constraints. The results of variance decomposition showed that the explanatory degrees of the root and leaf functional traits of *Astragalus adsurgens* on AGB and RW under the moderate salt-alkali treatment were 46.2%

收稿日期: 2025-09-02

基金项目: 吉林省自然科学基金-面上项目(20240101042JC); 吉林省农业科学院草地研究所基金项目(2060302); 国家自然科学基金-联合基金项目(U23A2004)

作者简介: 刘建(1993-), 男, 助理研究员, 硕士, 从事草场改良与牧草栽培研究。

通信作者: 高阳, E-mail: gaoyang2302@126.com

and 37.7% respectively, and those under the severe salt - alkali treatment were 66.7% and 35.7% respectively. Combined with the analysis of the economic spectrum, the roots, leaves and whole plants of *Astragalus adsurgens* showed an acquisitive strategy under phosphorus addition. From the moderate to severe salt - alkali treatment, the leaves of *Astragalus adsurgens* showed a conservative strategy, the roots showed an acquisitive strategy, and the whole plant showed a transition from an acquisitive to a conservative strategy.

Key words: *Astragalus adsurgens*; Phosphorus addition; Salt and alkali stress; Functional trait

沙打旺(*Astragalus adsurgens*)又名直立黄芪、麻豆秧,是豆科黄芪属多年生草本植物。沙打旺营养价值高、适口性好。作为豆科植物,与根瘤菌共生,可固定大气中的氮,显著提升土壤肥力^[1]。除作为优良牧草外,还具有极强的适应性和抗逆性^[2],由于其在防风固沙、调节土壤酸碱度等方面的突出特性,沙打旺常被用作退化草地土壤改良的重要植物^[3]。松嫩草地是我国典型的苏打盐渍化草地^[4],近年来受气候变化和人类活动的影响,草地退化问题日益严重,植被覆盖度下降,土壤盐碱化程度加剧。在此背景下,沙打旺作为盐碱草地生态修复的先锋物种,成为一种兼具生态与经济效益的恢复途径。而解析沙打旺抗盐碱的生态机制,不仅能够指导沙打旺的精准建植与管理,更可为盐碱草地生态系统结构与功能的协同恢复提供依据。

土壤养分状况尤其是磷元素的有效性是我国北方草地关键限制因素之一,随着土壤盐碱浓度的增加,一方面植物对磷的吸收能力会降低^[5],另一方面,较高pH值使土壤中超过75%的磷酸盐会与Ca²⁺、Mg²⁺等离子结合,形成难溶性化合物,进一步降低磷有效性^[6]。根和叶是植物获取资源的重要器官,植物通过根、叶功能性状变化增强了其对逆境耐受性^[7]。以往研究发现,外源磷输入能够改变原有养分供应状态,磷添加下柳枝稷(*Panicum virgatum*)比叶面积、叶片干物质量显著增加,进而缓解盐碱胁迫的危害^[8]。施用磷肥可以显著提高棉花(*Gossypium hirsutum*)在盐胁迫条件下的根长和比根表面积,降低其根冠比,从而适应逆境环境^[9]。对石竹(*Dianthus chinensis*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、苜蓿(*Medicago sativa*)和沙葱(*Allium mongolicum*)4种草本植物研究发现,在磷添加下,根系直径、根系组织密度、比根长均发生显著改变,且随着磷添加量增大,各个根系功能性状指标的响应不尽相同^[10]。因此,利用多种功能性状深入剖析养分添加下植物对逆境胁迫的影响机制^[11-15]成为研究热点。然而,对于沙打旺盐碱环境胁迫的响应研究多数从植物生理角度分

析^[1,3,16],磷和盐碱共同作用对沙打旺的影响及功能性状驱动机制鲜有报道。

本研究通过采集原位土壤进行盆栽模拟试验,精准还原松嫩不同盐碱化草地土壤条件,设定5个磷添加水平,以便更好地模拟磷养分供应的多样化比例。通过测定磷养分添加对松嫩苏打盐碱土壤下沙打旺的生物量变化,剖析沙打旺叶片、根系性状发挥的影响作用,结合植物功能性状经济谱效应分析,以期深入探讨磷添加下沙打旺对盐碱环境的适应策略,为松嫩苏打盐碱草地的生态修复以及可持续经营提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

2023年4—7月,选取吉林省大安市姜家甸中度及重度盐碱退化草原0~20 cm表层土壤(表1)。于大安市草原管理站温室进行盆栽试验。花盆直径16 cm、高度17.5 cm,每盆装入盐碱土2 kg。为确保每个盆中土壤养分均匀一致,将供试土壤进行充分混合、晾晒和过筛等处理,并剔除草根、石砾等杂质。采用沙打旺作为试验材料,其种子来自吉林省农业科学院草地与生态研究所,发芽率90%以上。筛选出饱满且大小均匀的种子,将其浸泡催芽并移栽到花盆中。试验采用完全随机设计,并设置中度、重度盐碱土壤和不同磷添加量两个因素。其中,磷素添加以过磷酸钙(P₂O₅≥16%)为准,分别设置P20(20 mg P/kg干土)、P40(40 mg P/kg干土)、P80(80 mg P/kg干土)、P160(160 mg P/kg干土)和P320(320 mg P/kg干土)共5个水平,以不添加磷素为对照组(CK),共计12个处理,每个处理设置3个重复。移栽10 d后进行间苗操作,确保每盆3株沙打旺幼苗,长势均匀,培养半个月后进行磷素添加处理。所有花盆每两天浇水1次,每次补水量为0.25 L,以避免受到干旱影响。温室内白天保持在24~27℃,夜间保持在18~21℃。

1.2 植物取样和测定

沙打旺移栽6周后进行取样,每株采集1片成熟无病虫害的叶片,装入有少量去离子水的封口

袋中,放入保温箱中并带回实验室,在黑暗条件下于4℃恒温冰箱中保存12h。取出平放并用滤纸吸干叶片表面水分,立即称重,即为叶片的饱和水鲜重(LFW, g),利用叶面积仪测量叶片的叶面积(LA, cm²),然后将叶片放入65℃烘箱中,烘干至恒重,称重获得叶片干重(LW, g)。将收获的植株地上部分在105℃烘箱中杀青25min后,再调到65℃下烘干到恒重为止,结合之前测定的LW,获得地上部生物量(AGB, g/株)。再将烘干沙打旺叶片磨碎过筛20目筛后分别用凯氏定氮法测定氮元素的含量(LNC, %),重铬酸钾滴定法测定碳元素含量(LCC, %),钒钼黄比色法测定磷元素的含量(LPC, %)。将沙打旺的根样品用流水洗净,不重叠地平铺在透明塑料薄板上,用扫描仪(Laserjet Tank MFP 2606sdw)在300 dpi分辨率下扫描,扫描好的图像采用Win-RHIZO软件,获得根长(RL, cm)、根尖数(RT, 个/株)、根表面积(RA mm²)、根体积(RB, mm³)、根直径(RD, mm)。最后将沙打旺根样品在65℃烘箱中烘干至恒重为止,获得沙打旺单株根系生物量(RW, g/株)。

1.3 数据处理

计算以下叶片干物质含量(LDMC, %)、比叶重(SLW, g/m²)、比叶面积(SLA, cm²/g)、比根长(SRL, m/g)、比根表面积(SRA, cm²/g)、根组织密度(RTD, g/cm³)等功能性状。公式如下:

$$SLA = \frac{LA}{LW} \dots\dots\dots (1)$$

$$SLW = \frac{LW}{LA} \dots\dots\dots (2)$$

$$LDMC = \frac{LW}{LFW} \dots\dots\dots (3)$$

$$RTD = \frac{RW}{RB} \dots\dots\dots (4)$$

$$SRL = \frac{RL}{RW} \dots\dots\dots (5)$$

$$SRA = \frac{RA}{RW} \dots\dots\dots (6)$$

利用Excel 2010整理数据,利用IBM SPSS 22软件对不同处理下沙打旺各指标数据先进行方差正态分布和方差齐性检验,运用Duncan检验对数据进行多重比较,显著性水平 $\alpha=0.05$ 进行单因素方差分析(One-way ANOVA),不同盐碱处理间(中度和重度)的差异则采用配对样本 t 检验($P<0.05$)。运用Pearson相关系数法对中度和重度处理下各指标进行相关性分析,在0.05水平进行双尾检验;运用偏最小二乘回归(PLSR)方法计算投影中各功能性状变量的重要性(VIP),即自变量对因变量的影响程度。用主成分分析法分别对叶、根和全株性状降维,检验是否符合一维经济谱;用Pearson相关系数表示各性状分别与第一主成分轴(PC1)和第二主成分轴(PC2)的变量关系。对叶、根和全株植物PC1得分进行 t 检验,以确定各经济谱的变化规律,利用R4.4.2软件中“vegan”包的“varpart”功能来完成方差分解分析,使用Origin 2021软件绘图。

表1 盆栽土壤化学性质
Table 1 Chemical indexes of potting soil

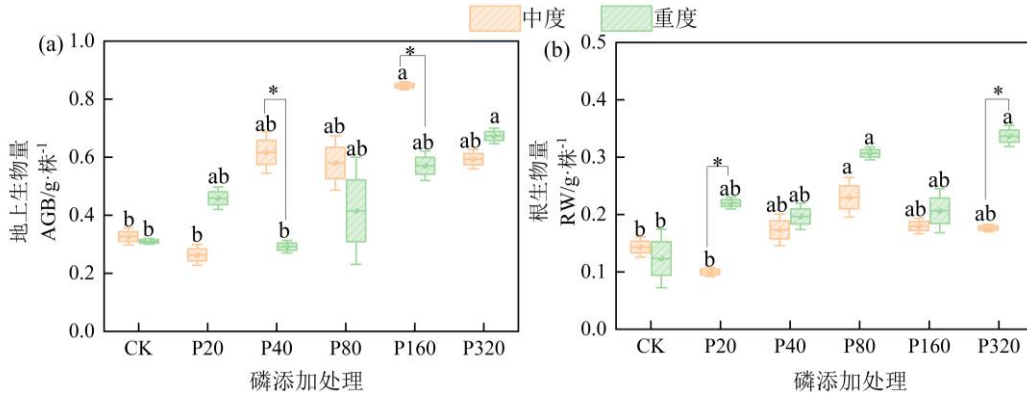
盐碱程度 Salinity	有机质/g·kg ⁻¹ Organic matter	总氮/% Total nitrogen	总磷/g·kg ⁻¹ Total phosphorus	速效磷/mg·kg ⁻¹ Rapid available phosphorus	pH	含盐量/g·kg ⁻¹ Saltness
中度盐碱土壤	12.66	0.07	0.16	10.06	8.89	1.93
重度盐碱土壤	5.42	0.06	0.17	13.64	9.62	2.11

2 结果与分析

2.1 不同磷添加对沙打旺地上生物量与根生物量对盐碱处理响应

如图1所示,在不同盐碱处理下,沙打旺AGB和RW均随磷添加量的增加呈上升趋势。中度盐碱处理在P160时AGB达到最大值0.86 g/株,与CK相比提高159.18%,差异显著。重度盐碱处理

在P320时达到最大值0.67 g/株,与CK相比提高117.20%,差异显著。中度盐碱处理沙打旺RW在P80达到最大值0.23 g/株,与CK相比提高86.48%,差异显著。重度盐碱处理沙打旺RW在P320达到最大值0.34 g/株,在P80和P320,与CK相比分别提升148.65%、172.98%,差异显著。AGB在P40、P160时,中度显著高于重度盐碱处理,RW在P20、P320时,重度显著高于中度盐碱处理。



注:不同小写字母表示同一盐碱土壤处理下不同磷添加处理之间差异显著($P \leq 0.05$), *表示同一磷处理下,不同退化土壤对沙打旺性状有显著影响($P \leq 0.05$),下同。

Note: Different lowercase letters indicate that there are significant differences among different phosphorus addition levels under the same saline-alkali treatment ($P \leq 0.05$). The asterisk * indicates that under the same phosphorus treatment, different saline-alkali soils have a significant impact on the traits of *Astragalus adsurgens* ($P \leq 0.05$), the same below.

图1 不同磷添加处理对沙打旺生长性状影响

Fig. 1 Effects of different treatments on the growth characteristics of *Astragalus adsurgens*

2.2 不同磷添加对沙打旺叶片功能性状对盐碱处理的响应

沙打旺 SLA、LNC、LPC 随着磷添加大体呈上

升趋势。在中度盐碱处理下,SLA 在 P80 时达到最大值 209.75 cm^2/g ,与 CK 相比提升 59.52%,差异显著。而在重度盐碱处理下,SLA 在 P320 时达到

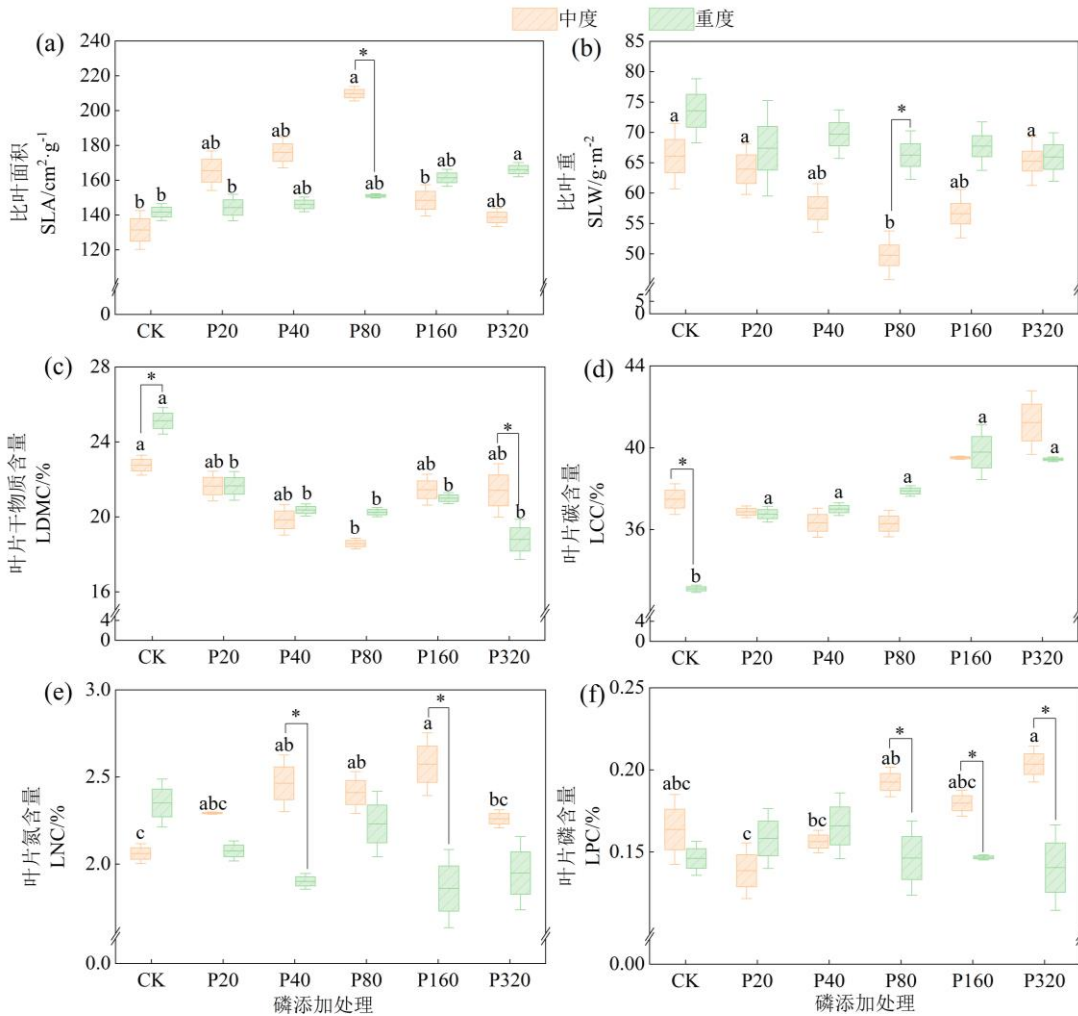


图2 不同磷添加处理对沙打旺叶片功能性状影响

Fig. 2 Effects of different treatments on functional traits of the leaves of *Astragalus adsurgens*

166.13 cm²/g, 与CK相比提升17.23%, 差异显著。重度盐碱处理下, 磷添加处理对LNC、LPC影响均不显著, 对LCC影响显著(图2e、图2f), 中度盐碱下, 磷添加处理对LNC、LPC影响显著, 对LCC影响不显著(图2d)。沙打旺SLW、LDMC大体呈下降趋势。在重度盐碱处理下, P320时LDMC达到最小值18.80%, 与CK相比下降25.00%, 差异显著。而在中度盐碱土壤中, P80时最小值18.57%, 与CK相比下降18.35%, 差异显著(图2c)。

2.3 不同磷添加对沙打旺根系功能性状对盐碱的响应

如图3所示, 在重度盐碱下, 沙打旺的RT和RL随着磷添加均呈现上升趋势, RT在P160和RL在P320时与CK相比分别提升143.92%、72.27%, 差异显著。中度盐碱处理下沙打旺的RT在P40和P320与CK相比分别提升110.92%、86.68%, 差异显著。RL在P320时与CK相比提升82.26%, 差异显著。沙打旺RT、RL在P160处理时重度显著

高于中度盐碱处理。沙打旺SRA与SRL随着磷增加均呈现上升趋势, 中度盐碱处理SRA在P80和P320时与CK相比均差异显著, SRL在P80和P320时显著高于CK, 重度盐碱处理SRL在P320时显著高于CK。沙打旺RTD随磷增加呈先升后降趋势。磷添加对重度盐碱处理下沙打旺RTD影响显著, RTD在P40和P80时显著高于CK, 磷添加对中度盐碱沙打旺RTD, 影响不显著。

2.4 沙打旺地上生物量与根生物量与功能性状之间关系

如图4、5所示, 在中度和重度盐碱处理下, 沙打旺LDMC与AGB、RW均呈极显著负相关关系。中度盐碱处理下, AGB与LNC、RW呈显著正相关关系, RW与LNC、LPC呈极显著正相关关系。在重度盐碱处理下, AGB与LCC、RT、RW呈正相关关系, RW与LCC、SRL、RL呈正相关关系, SLA与LDMC呈负相关关系。

如图6(a)所示, 通过PLSR分析发现, 无论是

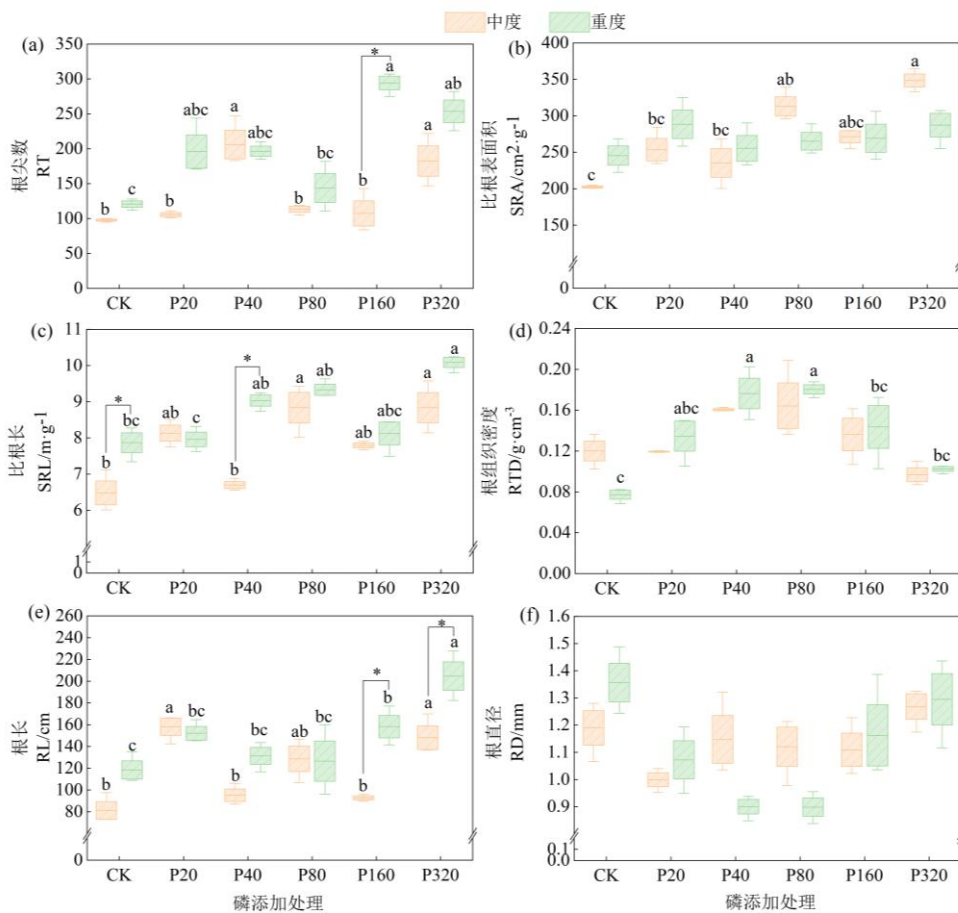
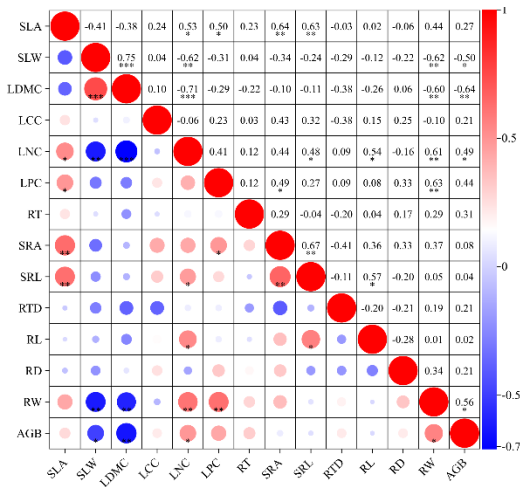


图3 不同处理对沙打旺根功能性状影响

Fig. 3. Effects of different treatments on functional traits of *Astragalus adsurgens*

中度还是重度盐碱处理下SRA、RT、RL、SLA的VIP均大于1, 表明他们是功能性状中沙打旺地上生物量和根系生物量的主要驱动因子。其中,

SRA对地上生物量和根生物量影响最大。如图6(b)和图6(c)方差分解结果表明, 中度盐碱处理下沙打旺根、叶功能性状对磷添加AGB、RW的解释



注:“**”、“*”分别表示在0.01、0.05水平上相关性显著(双尾检测),下同。

Note: ** and * indicate significant correlations at the 0.01 and 0.05 levels respectively (two-tailed test), the same below.

图4 中度盐碱胁迫下沙打旺功能性状之间关系

Fig.4 Relationships among functional traits of *Astragalus adsurgens* under moderate saline-alkali stress

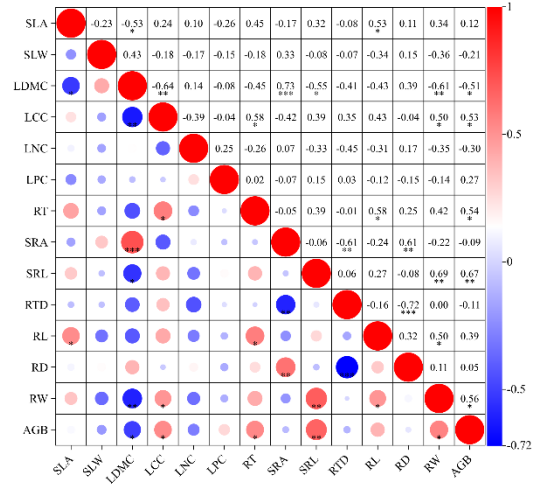


图5 重度盐碱胁迫下沙打旺功能性状之间关系

Fig.5 Relationships among functional traits of *Astragalus adsurgens* under severe saline-alkali stress

度分别为46.2%、37.7%,重度盐碱下解释度分别为66.7%、35.7%。在中度和重度盐碱下根功能性状解释度均高于叶功能性状,同时,根系功能性状方差解释率重度盐碱高于中度。

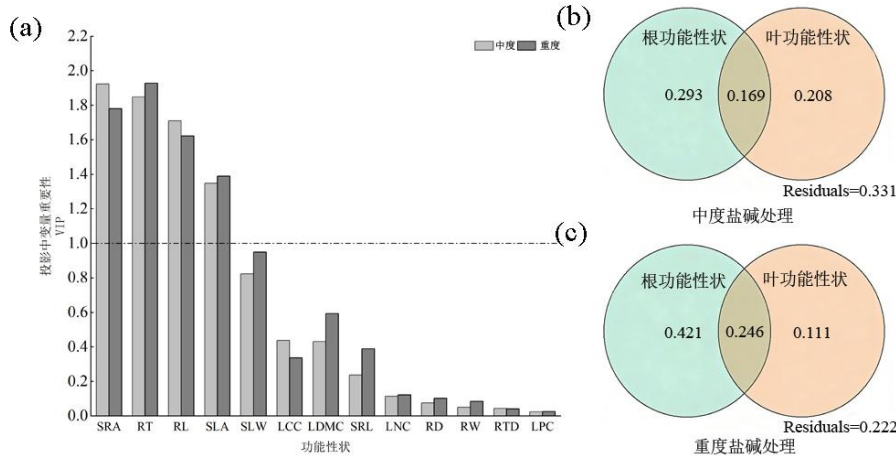


图6 沙打旺功能性状对地上生物量的影响

Fig. 6 Impacts of *Astragalus adsurgens* functional traits on aboveground biomass

2.5 不同处理沙打旺经济谱变化特征

如图7a所示,PC1、PC2共解释叶性状变异的74.06%,除LCC其余叶功能性状对轴1的贡献极显著(表2)。沿PC1代表获取策略的SLA、LNC、LPC、LCC含量集中在一端,代表保守策略的LDMC、SLW在另一端。叶PC1在不同盐碱处理下差异显著,与重度盐碱处理相比,中度盐碱处理沙打旺叶片表现出获取策略,叶PC1随着磷添加呈上升趋势,叶片表现出获取策略(图8d)。

如图7b所示,PC1、PC2共解释根性状变异的73.71%。各性状对PC1的贡献极显著(表2)。沿

PC1,代表获取策略的RT、RL含量集中在一端,代表保守策略的RTD在另一端。根PC1中度显著低于重度盐碱处理,重度盐碱处理下根系表现出获取的策略(图8b);根PC1随着磷添加呈上升趋势,在P320显著高于CK,根系表现出获取策略(图8e)。

如图7c所示,PC1、PC2共解释全株性状变异的67.01%。各性状对PC1的贡献显著(表2)。整体而言,代表保守策略的LDMC、RTD、SLW都在一端,代表获取策略的SLA、RT、RL在另一端。磷添加处理植物PC1显著高于CK,表现出积极的获取策略(图8f),植物PCI中度显著高于重度($P \leq$

表2 沙打旺叶、根和植物经济谱中个体性状与PC1和PC2得分的双变量关系

Table 2 Bivariate relationships of individual traits in leaves, roots, and the plant economics spectrum with PC1 and PC2 scores of *Astragalus adsurgens*.

功能性状 Functional trait	叶经济谱 Leaf economic spectrum		根经济谱 Root economic spectrum		植物经济谱 Whole-plant economic spectrum	
	Leaf economic spectrum		Root economic spectrum		Whole-plant economic spectrum	
	PC1	PC2	PC1	PC2	PC1	PC2
比叶面积/SLA	0.770**	-0.080			0.730**	0.200
比叶重/SLW	-0.819**	-0.120			-0.784**	0.190
叶片干物质含量/LDMC	-0.664**	0.463**			-0.790**	-0.140
叶片碳含量/LCC	0.310	-0.820**			0.353*	0.471**
叶片氮含量/LNC	0.667**	0.586**			0.540**	-0.310
叶片磷含量/LPC	0.630**	0.210			0.571**	-0.100
根尖数/RT			-0.010	0.725**	0.563**	0.439**
比根表面积/SRA			-0.190	0.479**	0.742**	-0.320
比根长/SRL			0.230	0.720**	0.536**	0.627**
根组织密度/RTD			0.260	-0.348*	-0.637**	0.522**
根直径/RD			0.040	0.724**	0.596**	0.577**
根长/RL			-0.180	0.300	0.583**	-0.612**

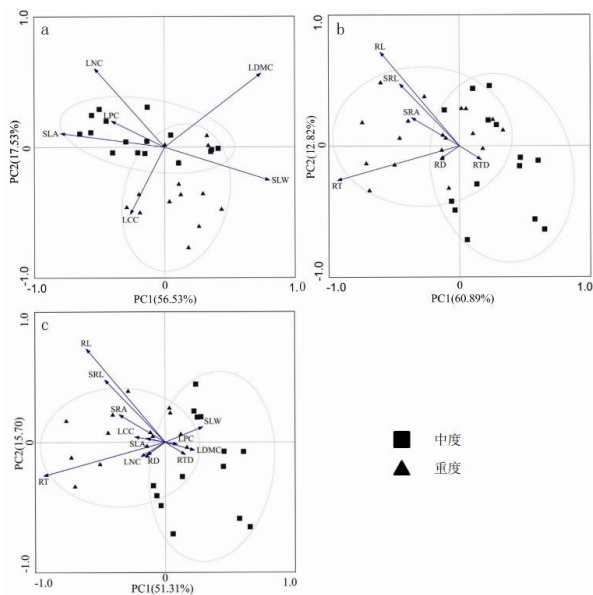


图7 沙打旺根叶功能性状主成分(PC)分析

Fig.7 Principal component (PC) analysis of root and leaf functional traits of *Astragalus adsurgens*

0.01),说明从中度到重度盐碱处理沙打旺整体的生态策略由获取向保守转变(图8c)。

3 讨论与结论

3.1 磷添加对沙打旺生物量缓解效应

松嫩盐碱化草原,因其较高盐分和高pH值,破坏了土壤-植物间的营养平衡,抑制植物生长^[17]。氮磷添加有效缓解松嫩草原初级生产力及

养分限制,显著提升植物地上生物量^[18]。本研究中,在盐碱处理下,磷添加均可提高沙打旺AGB,中度盐碱处理下在P160和重度盐碱处理下在P320沙打旺AGB涨幅均超过1倍,缓解作用最为显著,可能由于沙打旺受到磷养分制约严重,较高水平磷添加可快速改善土壤养分条件,促进植株生长,从而使沙打旺AGB得到显著提升^[8],同时发现随着盐碱程度增大,对磷养分限制不断增大^[6],因此在中度盐碱下当P160时沙打旺AGB达到最大,而在重度盐碱处理下沙打旺最大生物量出现在P320。此外,磷添加下,沙打旺RW与AGB在中度和重度盐碱处理下出现反差。在中度盐碱处理下AGB总体高于RW,而在重度盐碱处理下RW高于AGB,这与詹书侠等^[19]在羊草研究结果类似,说明重度盐碱条件下的沙打旺幼苗在获得磷养分时首先供应根生长,而在胁迫较弱的中度盐碱土壤中,优先供应地上部分生长,磷添加促使沙打旺AGB、RW进行重新分配有利于提高其对盐碱环境的适应性。

3.2 沙打旺叶片功能性状响应

SLA、LDMC可以反映植物对资源获取的能力,是植物功能性状研究的重要分析指标^[20]。本研究中,沙打旺SLA,在中度和重度盐碱胁迫下,均随着磷增加呈上升趋势,中度盐碱处理在P80时,重度在P320时SLA达到最大显著高于CK,这与Evans等^[21]研究结果相类似,随着土壤磷有效性

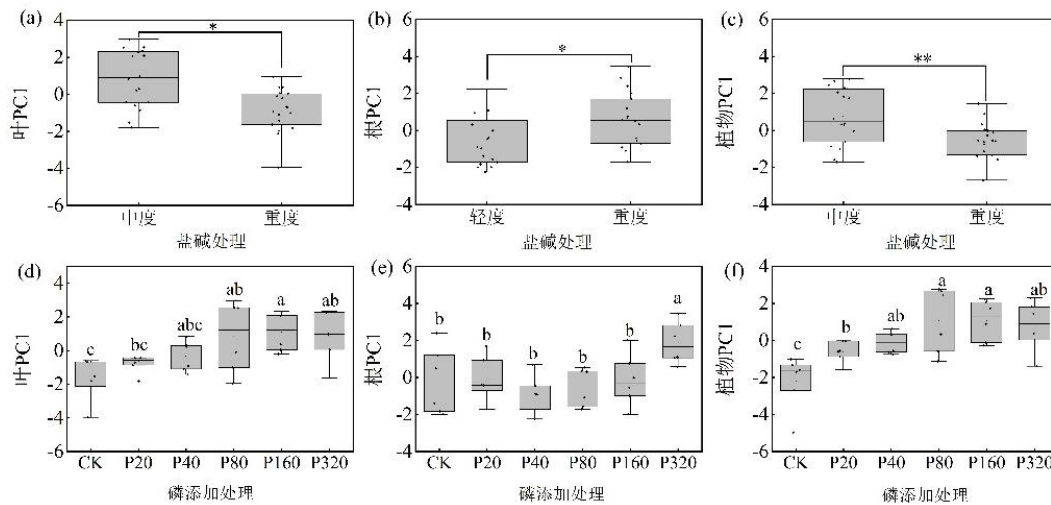


图8 沙打旺叶、根和植物经济谱PC1在盐碱处理、磷添加的差异

Fig. 8 Effects of saline-alkaline stress and phosphorus addition on functional traits and plant economic strategy (PC1) in *Astragalus adsurgens*

的提高,植物可获取的磷增多,植物倾向于对资源获取器官-叶片的投入更高,SLA越大,说明在盐碱胁迫较大时,植物更倾向于通过提高光合资源利用效率来实现补偿生长,进而缓解盐碱胁迫带来不利影响,长期的盐碱胁迫使植物倾向于增加营养资源投资,并由此发展出资源获取型策略^[22]。LDMC可以反映植物抵御外界胁迫及资源利用的能力,本研究发现磷添加对中度和重度盐碱处理均存在影响显著,且随磷添加呈下降趋势,中度盐碱P80时与对照相比下降18.35%,重度盐碱处理下,P320时下降25.00%。这与众多研究结果相反^[12,23-24],可能因为在水分和阳光充足情况下,磷添加有助于植物提高资源获取效率,来自盐碱胁迫对其影响相对减弱,LDMC随之降低^[25]。

3.3 根系功能性状的响应

盐碱土壤环境会限制植物根系对水和养分吸收,影响根系生长发育,进而影响植物根系形态建成^[26],合理的磷养分添加可以有效缓解盐碱土壤中 Na^+ 和 HCO_3^- 对植物根系潜在毒害作用^[27]。刘泓杉等^[7]研究发现,羊草根部分磷含量增加,促进了羊草根部分细胞分裂,根长和根尖数增加,这与本试验结果基本一致。重度盐碱处理下沙打旺SRA、SRL、RL、RT,随着磷添加大体呈上升趋势,说明磷养分的添加促进SRA、SRL、RL、RT增大,扩大了根系生长空间,进而提高对水分和养分的获取能力,以适应盐碱环境。磷添加对台湾相思幼苗(*Acacia confusa* Merr.)在盐胁迫的RTD没有显著影响^[28],与本试验结果并不一致。本研究发现,

在中度盐碱处理下磷添加对沙打旺RTD影响不显著,而重度盐碱处理影响显著,可能与盐碱胁迫强度有关,磷添加对重度盐碱胁迫下沙打旺RTD起到显著缓解效应,重度盐碱处理沙打旺RTD随着磷添加呈先升后降趋势,在P80时达到最大,可能因为沙打旺幼苗根系在低磷环境下通过自身调节使得RTD提高,加强了根系的韧性,增强了对盐碱环境的抵抗力,减少养分流失。当磷添加量增加到一定水平时,土壤养分充足,环境产生的胁迫相对减弱,致使RTD下降^[29]。

3.4 沙打旺根叶功能性状对生物量的调控作用及经济谱分析

在生态系统中,植物体各性状之间相互协同和权衡是其提高资源利用能力的一种生态策略^[30]。方差分解分析结果表明,中度和重度根功能性状对AGB和RW解释度均高于叶功能性状,这可能是由于植物通过快速调整地下器官构型与功能,优先保障水分-养分吸收与离子稳态,从而为地上部生存争取缓冲空间^[31]。根功能性状解释率重度高于中度盐碱处理下,这样与沙打旺遇到重度盐碱环境优先供应根生长结果保持一致。相关性分析表明,重度盐碱处理下沙打旺,RW与SRL、RL呈正相关关系,SRL代表根系获取资源能力,随着磷养分添加,根尖细胞分裂旺盛,根长增加使得比根长增大,由此沙打旺幼苗根系获取水分和土壤养分的能力增强,促进植株生长和RW累积,这与周娟娟等^[32]在养分添加对高寒草甸研究结果一致。

结合经济谱分析发现,与重度盐碱处理相比,中度盐碱下沙打旺叶片表现出获取策略,根系表现保守策略。可见,叶器官和根器官随着土壤盐碱程度变化,对资源利用策略并不完全同步,叶和根性状存在解耦现象,这与宋子豪等^[33]研究结果类似,可能由于环境压力下性状间的协调适应表现出资源利用策略的差异,性状间的相互作用反映各器官联系和协调。随着磷添加,沙打旺根叶及全株均表现出获取策略,沙打旺根系从土壤获得更多有效养分,促进叶片生长,光照和水分资源利用及养分储存。总体而言,无论是地上还是地下器官,获取策略使沙打旺在磷添加下显著生长,而随着盐碱胁迫加大,尽管根并未随叶片资源利用策略的变化而变化,仍能够持续为地上器官运送养分物质,但植株整体生长减缓,对营养物质需求降低,沙打旺整体以更保守的策略生存。

4 结 论

磷添加促使沙打旺 AGB 与 RW 重新分配,重度盐碱条件下的沙打旺幼苗先供应根生长,而在胁迫较弱的中度盐碱土壤中,优先供应地上部分生长。随着磷添加量的增加,沙打旺叶片 SLA、SRA、SRL、RL、RT 大体呈上升趋势,LDMC 呈下降趋势,有利于提高叶片和根系对水分和养分的获取能力。各表型性状和质量性状之间存在一定的协同变化关系,沙打旺 AGB、RW 与 LDMC 均呈显著负相关关系,中度盐碱处理下,AGB 与 LNC、RW 呈显著正相关关系,在重度盐碱胁迫下,AGB 与 LCC、RT、RW 呈正相关关系。方差分解分析表明中度和重度根功能性状对 AGB 和 RW 解释度均高于叶功能性状,磷添加下根、叶及全株表现出获取策略,从中度到重度盐碱处理沙打旺叶片表现出保守策略,根系表现出获取策略,全株表现出由获取向保守策略转变,体现了磷添加下沙打旺对盐碱环境的适应,同时充分利用资源以维持生长发育。该研究结果揭示了磷添加下不同盐碱处理的沙打旺功能性状经济谱,拓展了本研究对沙打旺适应策略的理解,为盐碱退化草地生态修复提供重要依据。

参考文献:

- [1] 王永新,夏方山,董秋丽,等.盐碱草地不同改良措施对沙打旺氮代谢的影响[J].草地学报,2012,20(2):324-330.
WANG Y X, XIA F S, DONG Q L, et al. Effect of improvement methods for saline-alkalin grasslands on nitrogen metabolism of *astragalus adsurgens*[J]. Acta Agrestia Sinica, 2012, 20(2): 324-330. (in Chinese)
- [2] 齐宝林,高阳,于洪柱,等.不同栽培模式下沙打旺对松嫩盐碱退化草甸改良效果[J].北方园艺,2019(23):80-85.
QI B L, GAO Y, YU H Z, et al. Effect of *astragalus adsurgens* under different cultivation patterns on improving Songnen degraded meadow[J]. Northern Horticulture, 2019(23): 80-85. (in Chinese)
- [3] 王宝增,张一名,张江丽,等.水杨酸对盐胁迫下沙打旺幼苗生长的影响[J].草业学报,2016,25(8):74-80.
WANG B Z, ZHANG Y M, ZHANG J L, et al. Effects of salicylic acid on growth of *Astragalus adsurgens* seedlings under salt stress[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(8): 74-80. (in Chinese)
- [4] 卢彦达,丰吉,邵泽,等.松嫩草甸草原植物群落物种组成和多样性对刈割和长期放牧的响应[J].草业科学,2024,41(2):271-283.
LU Y D, FENG J, SHAO Z, et al. Responses of plant communities, species composition, and diversity to mowing and long-term grazing in the songnen meadow steppe[J]. Pratacultural Science, 2024, 41(2): 271-283. (in Chinese)
- [5] SHI J, GONG J, LI X, et al. Phosphorus application promoted the sequestration of orthophosphate within soil microorganisms and regulated the soil solution P supply in a temperate grassland in northern China: A 31P NMR study[J]. Soil & Tillage Research, 2023, 227: 167-180.
- [6] 张璐,杨帆,王志春.碱化对土壤性质和植物生理生态特征的影响[J].东北农业科学,2021,46(2):30-36.
ZHANG L, YANG F, WANG Z C. Effects of alkalization on soil properties and plant physiological and ecological characteristic [J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2021, 46(2):30-36. (in Chinese)
- [7] 刘泓杉,李晴宇,黄宇金,等.不同土壤盐碱梯度下羊草最适氮、磷肥施用量模拟[J].吉林农业大学学报,2019,41(5):592-599.
LIU H S, LI Q Y, HUANG Y J, et al. Simulation of the optimal N and P fertilizing amount of *leymus chinensis* under different saline-alkali gradients of soil[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2019, 41(5): 592-599. (in Chinese)
- [8] 何海锋,吴娜,刘吉利,等.盐碱条件下施磷对柳枝稷生长发育及耐盐性的影响[J].草业学报,2022,31(10):64-74.
HE H F, WU N, LIU J L, et al. Effects of phosphorus application on the growth and salt resistance of switch grass under saline alkali conditions[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(10): 64-74. (in Chinese)
- [9] 孙嘉璘,侯振安.磷对盐碱胁迫下棉花离子平衡及相关调控基因的影响[J].植物营养与肥料学报,2022,28(4):643-653.
SUN J L, HOU Z A. Effect of phosphorus on ionic balance and expression of related regulatory genes of cotton under salt and alkali stresses[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(4): 643-653. (in Chinese)
- [10] 张家铨,韩飞,夏蕾,等.四种草本植物生长性状和根性状对磷添加的响应策略[J].中国草地学报,2023,45(1):43-52.
ZHANG J Z, HAN F, XIA L, et al. The response strategies of

- growth and root traits to phosphorus addition in four herbaceous plants[J]. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(1): 43-52. (in Chinese)
- [11] 戚智彦, 吕亚香, 刘伟, 等. 氮磷养分共同添加促进退化典型草原恢复的机制_戚智彦[J]. 应用生态学报, 2023, 34(1): 75-82.
QI Z Y, LYU Y X, LIU W, et al. Mechanism for the restoration of degraded typical steppe by nitrogen and phosphorus co-addition [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(1): 75-82. (in Chinese)
- [12] 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. (in Chinese)
- [13] 吴洪生, 陈小青, 马文舟, 等. 磷石膏改良滨海盐土效果及对小麦生长的影响[J]. 土壤学报, 2024, 61(4): 1077-1087.
WU H S, CHEN X Q, MA W Z, et al. Effects of Phosphogypsum on coastal saline-sodic soil and the growth of winterwheat[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(4): 1077-1087. (in Chinese)
- [14] 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. (in Chinese)
- [15] 昂叶菲, 郭悦, 陈慧颖, 等. 植物磷营养与非生物胁迫的互作机理及其在农业上的潜在应用[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(12): 2345-2359.
ANG Y F, GUO Y, CHEN H Y, et al. Interaction between plant phosphorus nutrition and abiotic stress responses and its potential application in agricultural production[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, 29(12): 2345-2359. (in Chinese)
- [16] 卫士美, 陈莉, 樊存虎, 等. 氯化钠胁迫对沙打旺幼苗生化指标的影响[J]. 浙江农业科学, 2017, 58(12): 2210-2211, 2214.
WEI S M, CHEN L, FAN C H, et al. Effects of sodium chloride stress on biochemical indices of seedlings of Satawang[J]. Zhejiang Agricultural Sciences, 2017, 58(12): 2210-2211, 2214. (in Chinese)
- [17] 韦银珠, 李家红, 孙雪铜, 等. 松嫩盐碱退化草地土壤理化性质及离子变化规律分析[J]. 草地学报, 2024, 32(6): 1702-1709.
WEI Y Z, LI J H, SUN X T, et al. Analysis of soil physical and chemical properties and ion variation rule of saline-alkali degraded grassland in Songnen[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(6): 1702-1709. (in Chinese)
- [18] 凌小莉, 史宝库, 崔海莹, 等. 氮磷添加对松嫩草地土壤团聚体结构及其碳含量的影响[J]. 中国草地学报, 2021, 43(2): 54-63.
LING X L, SHI B K, CUI H Y, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil aggregates structure and carbon content in Songnen grassland[J]. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(2): 54-63. (in Chinese)
- [19] 詹书侠, 郑淑霞, 王扬, 等. 羊草的地上-地下功能性状对氮磷施肥梯度的响应及关联[J]. 植物生态学报, 2016, 40(1): 36-47.
ZHAN S X, ZHENG S X, WANG Y, et al. Response and correlation of above- and below-ground functional traits of *Leymus chinensis* to nitrogen and phosphorus additions[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(1): 36-47. (in Chinese)
- [20] 代景忠, 白玉婷, 卫智军, 等. 切根对羊草营养生长期内植物功能性状的影响[J]. 植物生态学报, 2021, 45(12): 1292-1302.
DAI J Z, BAI Y T, WEI Z J, et al. Effects of root-cutting in the vegetative phase on plant functional traits of *Leymus chinensis* [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021, 45(12): 1292-1302. (in Chinese)
- [21] EVANS J R, POORTER H. Photosynthetic acclimation of plants to growth irradiance: the relative importance of specific leaf area and nitrogen partitioning in maximizing carbon gain[J]. Plant Cell & Environment, 2010, 24(8): 755-767.
- [22] 朱文琰, 许明圆, 朱若琳, 等. 高寒草甸3种牧草叶片性状对不同放牧模式的响应[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2023, 44(3): 79-88, 95.
ZHU W Y, XU M Y, ZHU R L, et al. Responses of leaf traits of three forages to different grazing patterns in alpine meadow[J]. Journal of Henan University of Science and Technology(Natural Science), 2023, 44(3): 79-88, 95. (in Chinese)
- [23] 高君亮, 罗凤敏, 赵英铭, 等. 乌兰布和沙漠绿洲两种农作物叶片性状特征研究[J]. 东北农业科学, 2016, 41(1): 38-42.
GAO J L, LUO F M, ZHAO Y M, et al. Studies on leaf traits of two kinds of crops in ulanbuh desert oasis[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2016, 41(1): 38-42. (in Chinese)
- [24] 王旭敏, 雒文鹤, 刘朋召, 等. 节水减氮对夏玉米干物质和氮素积累转运及产量的调控效应[J]. 中国农业科学, 2021, 54(15): 3183-3197.
WANG X M, LUO W H, LIU P Z, et al. Regulation effects of water saving and nitrogen reduction on dry matter and nitrogen accumulation, transportation and yield of summer maize[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(15): 3183-3197. (in Chinese)
- [25] 周小国, 胡雨彤, 赵婷婷, 等. 氮添加下丛枝菌根真菌对羊草生长及养分吸收的影响[J]. 中国草地学报, 2024, 46(5): 44-51.
ZHOU X G, HU Y T, ZHAO T T, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and nutrient uptake of *leymus chinensis* under nitrogen addition[J]. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(5): 44-51. (in Chinese)
- [26] 米热扎提江·喀由木, 西尔艾力·吾麦尔江, 李晓瞳, 等. 棉花苗期耐低磷种质筛选及耐低磷综合评价[J]. 中国农业科学, 2023, 56(21): 4150-4162.
MIREZHATIJIANG KAYOUMU, XIERAILI WUMAIERJIANG, LI X T, et al. Screening of low phosphorus tolerant germplasm in cotton at seedling stage and comprehensive evaluation of low phosphorus tolerance[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(21): 4150-4162. (in Chinese)
- [27] 冯晓敏, 高翔, 吕慧卿, 等. 抗旱糜子根系生长特性及叶片表皮结构对水分胁迫的响应[J]. 作物杂志, 2024(4): 172-179.
FENG X M, GAO X, LYU H Q, et al. The responses of root growth characteristics and leaf epidermal structure of drought-resistant broom corn millet to water stress[J]. Crops, 2024(4): 172-179. (in Chinese)
- [28] 罗倩, 陈灿, 袁锋, 等. NaCl单一胁迫及NaCl胁迫下施磷对

- 台湾相思幼苗生长和根形态的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2023, 32(5): 78-88.
- LUO Q, CHEN C, YUAN F, et al. Effects of NaCl single stress and phosphorus application under NaCl stress on the growth and root morphology of *Acacia confusa* seedlings[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2023, 32(5): 78-88. (in Chinese)
- [29] 李金霞, 孙小妹, 刘娜, 等. 黑果枸杞功能性状对氮磷添加的响应及其可塑性[J]. 应用生态学报, 2021, 32(4): 1279-1288.
- LI J X, SUN X M, LIU N, et al. Response and plasticity of functional traits in *Lycium ruthenicum* to N and P addition[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(4): 1279-1288. (in Chinese)
- [30] 魏晶晶, 秦瑞敏, 张中华, 等. 不同退化程度高寒草地植物群落与土壤性质变化及相关性分析[J]. 草地学报, 2022, 30(11): 3035-3045.
- WEI J J, QIN R M, ZHANG Z H, et al. Characteristics and interrelationship of plant community and soil properties in different degraded alpine grasslands[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(11): 3035-3045. (in Chinese)
- [31] 杨奕颖, 苏思霖, 曹恩志, 等. 沙漠大型光伏电站对固沙植物表型及生物量分配的影响[J]. 中国沙漠, 2025, 45(1): 162-172.
- YANG Y Y, SU S L, CAO E Z, et al. Impacts of large-scale desert photovoltaic power stations on the phenotype and biomass distribution characteristics of sand-fixing plants[J]. Journal of Desert Research, 2025, 45(1): 162-172. (in Chinese)
- [32] 周娟娟, 刘云飞, 王敬龙, 等. 短期养分添加对西藏沼泽化高寒草甸地上生物量、植物多样性和功能性状的影响[J]. 草业学报, 2023, 32(11): 17-29.
- ZHOU J J, LIU Y F, WANG J L, et al. Effect of short-term nutrient addition on aboveground biomass, plant diversity, and functional traits of swampy alpine meadow in Tibet[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(11): 17-29. (in Chinese)
- [33] 宋子豪, 苏常红, 寻雅雯, 等. 海拔梯度影响下晋北芦芽山亚高山草地生态系统植物功能性状经济谱分析[J]. 生态学报, 2025, 45(4): 1-13.
- SONG Z H, SU C H, XUN Y W, et al. Economic spectrum analysis of plant functional traits in the subalpine grassland ecosystem of Luya Mountain in northern Shanxi Province under the influence of altitude gradient[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(4): 1-13. (in Chinese)
- (责任编辑: 王 昱)
-
- (上接第 67 页) SUN W, CHENG Z J, HE S C, et al. The research of occurrence regularity of *Mythimna separate* (Walker) in Jilin Province[J]. Journal of Environmental Entomology, 2019, 41(6): 1260-1267. (in Chinese)
- [14] 岳宗岱, 张才, 袁艺, 等. 吉林省草地螟发生及其防治调查报告[J]. 吉林农业科学, 1983, 8(1): 64-67.
- YUE Z D, ZHANG C, YUAN Y, et al. Epidemiology and integrated control strategies of Beet Webworm (*Loxostege sticticalis*) in Jilin Province[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 1983, 8(1): 64-67. (in Chinese)
- [15] 陈晓, 陈继光, 薛玉, 等. 东北地区草地螟 1999 年大发生的虫源分析[J]. 昆虫学报, 2004, 47(5): 599-606.
- CHEN X, CHEN J G, XUE Y, et al. Immigration of the 1999 outbreak populations of the meadow moth, *Loxostege sticticalis* L. (Lepidoptera: Pyralidae) into the Northeastern Part of China[J]. Acta Entomologica Sinica, 2004, 47(5): 599-606. (in Chinese)
- [16] 陈晓, 翟保平, 宫瑞杰, 等. 东北地区草地螟(*Loxostege sticticalis* L.)越冬代成虫虫源地轨迹分析[J]. 生态学报, 2008, 28(4): 1521-1535.
- CHEN X, ZHAI B P, GONG R J, et al. The source area of spring populations of meadow moth, *Loxostege sticticalis* L. (Lepidoptera: Pyralidae) in Northeastern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(4): 1521-1535. (in Chinese)
- [17] 作均祥. 农业昆虫学北方本(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016: 281-285.
- [18] 岳宗岱, 袁艺. 吉林省草地螟虫源和发生条件的初步分析[J]. 吉林农业科学, 1983, 8(3): 78-81.
- YUE Z D, YUAN Y Y. Preliminary analysis on the origin and occurrence conditions of Beet Webworm (*Loxostege sticticalis*) in Jilin Province[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 1983, 11(3): 78-81. (in Chinese)
- [19] 袁锋. 农业昆虫学(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 193-197.
- [20] 刘杰, 姜玉英, 曾娟, 等. 2018 年我国东北局部草地螟重发[J]. 中国植保导刊, 2019, 39(5): 36-41.
- LIU J, JIANG Y Y, ZENG J, et al. Meadow moth (*Loxostege sticticalis*) occurred severely in Partial Area of Northeast of China in 2018[J]. China Plant Protection, 2019, 39(5): 36-41. (in Chinese)
- [21] 孙雅杰, 高月波. 黏虫和草地螟空中迁飞种群的雷达监测与地面发生预报[A]. 中国昆虫学会 2000 年学术年会论文集[C]. 北京: 中国昆虫学会, 2000: 457-460.
- (责任编辑: 王 昱)