

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.02.013

引用格式:郭美莹,刘亚玲,李晓霞,等.‘中苜3号’紫花苜蓿对不同盐碱胁迫的生长和生理响应[J].草地学报,2026,34(2):509—517

GUO Mei-ying, LIU Ya-ling, LI Xiao-xia, et al. Growth and Physiological Responses of ‘Zhongmu No. 3’ Alfalfa Cultivar to Different Saline-Alkali Stresses[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(2):509—517

‘中苜3号’紫花苜蓿对不同盐碱胁迫的生长和生理响应

郭美莹¹, 刘亚玲³, 李晓霞², 刘希强², 赵彦^{1*}

(1. 内蒙古农业大学草业学院/草地资源教育部重点实验室, 内蒙古呼和浩特 010010; 2. 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所/国家林业和草原局草原研究中心, 北京 100091; 3. 内蒙古草业技术创新中心有限公司, 内蒙古呼和浩特 010070)

摘要:为探究紫花苜蓿在盐碱土壤环境下的生长和代谢适应性,本试验以‘中苜3号’紫花苜蓿扦插苗为试验材料,设置中性盐(Neutral salt stress, $\text{NaCl} + \text{Na}_2\text{SO}_4$)和碱性盐(Alkaline salt stress, $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{NaHCO}_3$)胁迫处理,分别设置轻度(0.3%土壤含盐量, Light)、中度(0.6%, Moderate)和重度(0.9%, Severe)三个梯度处理。胁迫15天后测定植株叶和根的生长生理指标。结果表明,紫花苜蓿在盐碱胁迫下表现出显著的生长和生理响应。随着胁迫程度增加,中性盐处理下的生长指标在重度胁迫处理(NS)下最低,碱性盐处理下随着处理程度的增加逐渐降低。叶和根中的钠离子(Na^+)含量在不同处理下均显著增加,叶中丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量在中性盐中度胁迫处理(NM)和NS下显著升高;根和叶中的MDA含量在不同碱性盐胁迫下均显著增加。根中脯氨酸(Proline, Pro)含量在不同胁迫下均显著升高,超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)活性随胁迫程度增加呈先升高后降低的变化。本研究揭示了紫花苜蓿在盐碱胁迫下的生长和代谢适应机制,为耐盐碱品种选育提供了研究参考。

关键词:紫花苜蓿;盐碱胁迫;生长指标;生理响应

中图分类号:S541.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)02-0509-09

Growth and Physiological Responses of ‘Zhongmu No. 3’ Alfalfa Cultivar to Different Saline-Alkali Stresses

GUO Mei-ying¹, LIU Ya-ling³, LI Xiao-xia², LIU Xi-qiang², ZHAO Yan^{1*}

(1. College of Grassland Science, Inner Mongolia Agricultural University, Key Laboratory of Grassland Resources (IMAU), Hohhot, Inner Mongolia 010010, China; 2. Institute of Ecological Protection and Restoration, Chinese Academy of Forestry/Grassland Research Center, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China; 3. Inner Mongolia Pratacultural Technology Innovation Center Co., Ltd, Hohhot, Inner Mongolia 010070, China)

Abstract: To investigate the growth and metabolic adaptability of alfalfa (*Medicago sativa* L.) under saline-alkali soil conditions, this experiment used ‘Zhongmu No. 3’ alfalfa cuttings as the test material. Set up neutral salt stress ($\text{NaCl} + \text{Na}_2\text{SO}_4$) and alkaline salt stress ($\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{NaHCO}_3$) treatments, with three gradient levels for each: light (0.3% soil salinity), moderate (0.6%), and severe (0.9%). After 15 days of stress, the growth physiological indicators of plant leaves and roots were measured. The results showed that alfalfa exhibited significant growth and physiological responses under saline-alkali stress. With increasing stress intensity, growth parameters under neutral salt treatment reached the lowest level under severe stress treatment (NS),

收稿日期:2025-03-11;修回日期:2025-04-08

基金项目:农业生物育种重大专项(2022ZD0401705);2023年国家草业技术创新中心(筹)重大创新平台建设专项(CCPTZX2023W01);2023年呼和浩特市“揭榜挂帅”项目(2023-揭榜挂帅-社-1)资助

作者简介:郭美莹(1999-),女,汉族,内蒙古锡林郭勒人,硕士研究生,主要从事草种质资源与育种研究,E-mail:15847769348@163.com;

*通信作者 Author for correspondence, E-mail:zhaoyannmg@imau.edu.cn

whereas alkaline salt treatment exhibited a gradual decrease in growth parameters as treatment intensity escalated. The sodium ion (Na^+) content in the leaves and roots significantly increased under different treatments. The content of malondialdehyde (MDA) in the leaves significantly rose under moderate (NM) and NS neutral salt stress treatments; meanwhile, the MDA content in both roots and leaves significantly increased under various alkaline salt stresses. The proline (Pro) content in the roots significantly increased under different stresses, while the activity of superoxide dismutase (SOD) first increased and then decreased as the stress level rose. This study reveals the growth and metabolic adaptation mechanisms of alfalfa under saline-alkali stress, providing research references for the breeding of salt-tolerant varieties.

Key words: Alfalfa; Saline-alkali stress; Growth traits; Physiological response

土壤盐碱化是在不利的气候、水文等自然条件以及过度放牧、盲目开垦等人为因素干扰下,易溶性盐类在土壤中重新分配、过量积累和扩散所形成的^[1-2]。土壤盐碱化严重影响植物的生长发育,已成为全球制约农作物生产的主要因素^[3]。2015年联合国教科文组织和粮农组织发布的数据显示^[4],我国盐碱地为 $9.9 \times 10^7 \text{ hm}^2$,其中有 $9.3 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 在耕地红线外,大面积的盐碱地缺乏有效利用,对我国农牧业生产和发展是一种极大的资源浪费。目前大约60%的盐渍土同时存在碱化问题,这是由于大量的碳酸钠(Na_2CO_3)或碳酸氢钠(NaHCO_3)造成的^[5-6]。盐碱胁迫会引起植物更强烈的细胞氧化应激,离子严重失衡,渗透调节能力下降,并最终降低必需营养元素的摄取率^[7]。各类盐碱环境对植物的胁迫作用存在差异,一般对植物的伤害强度为相同浓度下,碱>混合盐碱>盐^[8]。根据土壤的盐分浓度和pH值,盐碱胁迫可分为三个等级:轻度(含盐量 $\leq 0.3\%$, pH 7.1~8.5),中度(含盐量 $0.3\% \sim 0.6\%$, pH 8.5~9.5)和重度(含盐量 $\geq 0.6\%$, pH 9.5以上)^[9]。将低产田或不适宜种粮的盐碱地加以利用,建植人工草地,能为饲草种植提供非常重要的应用场景,既能够有效改善土壤结构和培肥地力,又可以提高饲草供给能力,转化为居民所需的蛋白类食物,对于保障我国食物供应安全具有重要意义^[10-11]。

紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)是世界上栽培最广泛,最重要的多年生豆科牧草,因其营养价值高、生产潜力大,并兼具抗旱、耐盐碱等特点而闻名^[12-13]。‘中苜3号’紫花苜蓿(*Medicago sativa* ‘Zhongmu No. 3’)是目前国内耐盐性较好的栽培品种,在我国黄淮海盐碱区和内陆盐碱地广泛种植推广^[14]。已有研究表明,紫花苜蓿在生长和生理响应机制方面对不同程度的盐碱胁迫具有一定的耐受力^[13,15]。王晓春等^[16]研究发现,紫花苜蓿幼苗在0.3%的混合盐碱胁迫下,株高和生物量最大,而在

0.6%,0.9%和1.2%的盐碱胁迫下,株高和生物量依次降低。贾秀峰等^[17]研究得出随复合盐碱处理浓度增加,紫花苜蓿叶片中的相对电导率和MDA(Malondialdehyde)含量上升,膜脂氧化损伤程度加重。张永峰等^[18]在 NaCl 和 Na_2CO_3 胁迫对紫花苜蓿生理指标影响的研究中得出,随着盐浓度增大,紫花苜蓿中可溶性糖(Soluble sugar, SS)、脯氨酸(Proline, Pro)含量升高。朱晨晨等^[19]发现紫花苜蓿在0.78%混合盐碱溶液胁迫下,SS、Pro、地上、地下部的 K^+ 含量显著升高,而光合作用、光合荧光参数和叶绿素水平显著下降。目前对于紫花苜蓿耐盐碱的研究多为中性盐或混合盐碱胁迫,在中性盐和碱性盐胁迫对紫花苜蓿生长生理的影响方面研究较少。

由于紫花苜蓿异花授粉,基因组高度杂合的特性,本研究以‘中苜3号’紫花苜蓿为研究对象进行扦插培养,以保证实验材料基因型和生长的一致性。通过分别模拟中性盐和碱性盐土壤状况,研究不同盐碱胁迫下紫花苜蓿生长表型指标以及叶片和根的膜稳定性、渗透调节物质、抗氧化酶等一系列生理指标的变化规律,探究紫花苜蓿成株在盐碱土壤环境下的生长和代谢适应性,为紫花苜蓿耐盐碱机理研究以及耐盐碱品种培育提供研究参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

‘中苜3号’紫花苜蓿二年生植株的茎枝由中国农业科学院北京畜牧兽医研究所提供。2023年5月,剪取单株‘中苜3号’紫花苜蓿当年生茎枝,于中国林业科学研究院科研温室内进行扦插培养。待扦插苗生根后移栽至花盆(13.5 cm×26 cm)中,基质为原土:蛭石=3:1,每盆土干重为1.5 kg。每周浇500 mL 1/2浓度的Hoagland营养液。

1.2 试验方法

42 棵扦插苗株高长至 25 cm 左右时,选择生长健壮、长势一致的扦插苗分别进行中性盐(NaCl:Na₂SO₄=2:1,摩尔比)和碱性盐(NaHCO₃:Na₂CO₃=

5:1,摩尔比)处理。每个处理组按照每盆土干重的 0.3%(轻度),0.6%(中度)和 0.9%(重度)施加盐溶液,每组设置 6 个生物学重复。每盆加盐量如表 1 所示。

表 1 不同处理组添加的盐量

Table 1 Amount of salt added to different treatment groups

处理 Treatment	pH 值 pH value	电导率 EC/(μs·cm ⁻¹)	各处理组添加盐量 The amount of salt added to each treatment group/g			
			NaCl	Na ₂ SO ₄	NaHCO ₃	Na ₂ CO ₃
CK	7.55	3.77	—	—	—	—
NL	7.52	16.27	2.00	2.40	—	—
NM	7.47	28.23	4.00	4.80	—	—
NS	7.54	41.13	6.00	7.20	—	—
AL	8.97	6.17	—	—	3.60	0.90
AM	9.37	8.73	—	—	7.20	1.80
AS	9.56	9.44	—	—	10.80	2.70

注:CK,对照组;NL,中性盐轻度胁迫处理;NM,中性盐中度胁迫处理;NS,中性盐重度胁迫处理。AL,碱性盐轻度胁迫处理;AM,碱性盐中度胁迫处理;AS,碱性盐重度胁迫处理。下同

Note: CK, control; NL, light treatment of neutral salt stress; NM, moderate treatment of neutral salt stress; NS, severe treatment of neutral salt stress. AL, light treatment of alkaline salt stress; AM, moderate treatment of alkaline salt stress; AS, severe treatment of alkaline salt stress. The same as below

1.3 测定内容与方法

1.3.1 生长指标测定 处理 15 天后,对紫花苜蓿的生长指标包括株高、根长、地上部生物量和地下部生物量进行测定:

(1)株高:使用毫米刻度尺测量植株基部到顶叶的高度,记为绝对株高;

(2)根长:将植株根部土壤用水轻轻冲洗干净,使用毫米刻度尺测量主根根尖到根颈的长度,记为根长;

(3)地上部生物量、地下部生物量:将植株地上部与地下部剪开,吸水纸吸干表面水分,称取地上部、地下部鲜重,记为地上部和地下部生物量。

1.3.2 生理指标测定 同时,分别采集对照组和各处理组植株的叶片和根,使用电导仪(PHS-3C,上海仪电科仪)测定叶片电导率(EC)。去离子水将鲜叶样品冲洗干净,吸水纸擦干后将叶片剪成 2 mm 长条混合均匀,每份样品称取 0.3 g,重复 3 次;玻璃试管中加入 10 mL 去离子水,使用电导仪测得其电导率,记为 S₀;样品依次放入玻璃试管中,加入 10 mL 去离子水,在室温下浸泡 12 h 后测其电导率,记为 S₁;S₀,S₁测量结束后,将装有样品的试管进行沸水浴 30 min,而后冷却至室温测其电导率,记为 S₂;计算叶片电导率(%)=(S₁-S₀)/(S₂-S₀)×100%。

分别使用北京索莱宝科技有限公司的植物 MDA,SOD,SS,Pro 含量检测试剂盒依照说明书步

骤进行提取,利用紫外分光光度计法测定并计算含量^[20-21]。

MDA 含量(nmol·g⁻¹)计算公式如下:

$$\omega(\text{MDA})=(\Delta A+0.0055)\div 0.025\times V_e\div W=40\times(\Delta A+0.0055)\div W \quad (1)$$

其中 ΔA=A₅₃₂-A₆₀₀;V_e表示加入提取液体积(mL);W 表示样品质量(g);0.025 表示曲线斜率;0.0055 表示曲线截距。

SOD 活性(U·g⁻¹)计算公式如下:

$$\omega(\text{SOD})=(A_1-A_2)\div A_1\times 100\%\div [1-(A_1-A_2)\div A_1\times 100\%]\times V_1\div (W\times V_2\div V_3) \quad (2)$$

其中 A₁表示对照吸光度,A₂表示测定管吸光度,V₁表示反应体系总体积(0.2 mL);V₂表示加入反应体系中样本体积(0.01 mL);V₃表示加入提取液体积(mL);W 表示样本质量。

SS 含量(mg·g⁻¹)计算公式如下:

$$\omega(\text{SS})=C\times V_l\times D/(V\times m\times 0.001) \quad (3)$$

其中 C 表示根据标准曲线查得样品的含量(μg);V_l表示提取液总体积(mL);V 表示取液体积(mL);m 表示称样量(g);D 表示稀释倍数。0.001 表示将 μg 转换为 mg。

Pro 含量(μg·g⁻¹)计算公式如下:

$$\omega(\text{Pro})=x\times V_e\div W=x\div W \quad (4)$$

以标准溶液浓度为横坐标,ΔA 标准为纵坐标绘制标准曲线,得到线性回归方程 y=kx+b,将 ΔA 代入方程得到 x(μg·mL⁻¹);V_e表示加入提取液体积(1 mL);

W 表示样本质量(g)。

钠离子总含量采用电热板消解法-ICP-MS/ICP-OES测定^[22]。称取全部风干、过筛的样品置于聚四氟乙烯消解器中。加入 10 mL 硝酸-高氯酸混合溶液,于电热板上消解,直至冒白烟,消化液呈无色透明或略带黄色,用水定容 25 mL,混匀并测定含量,同时做空白试验,并绘制标准曲线。钠离子质量分数($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)计算公式如下:

$$\omega(\text{Na}^+)=[(\rho-\rho_0)\times V\times f]\div m \quad (5)$$

其中, ρ 表示 Na^+ 质量浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); ρ_0 表示空白溶液中 Na^+ 质量浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); V 表示消化液定容体积(mL); f 表示稀释倍数; m 表示称取质量或移取体积(g或mL)。

1.4 数据处理

利用 SPSS 19 软件进行数据分析,采用单因素

方差分析(One-way ANOVA)和 Duncan 法进行比较分析,利用 Origin 2021 进行作图。

2 结果与分析

2.1 紫花苜蓿在中性盐胁迫下的生长和生理响应

2.1.1 中性盐胁迫下紫花苜蓿的生长变化 在中性盐胁迫处理下,随胁迫程度增加,紫花苜蓿在 NS 处理下的株高显著低于 CK, NL, NM 处理(图 1a)。NS 处理下的根长显著低于 NL 处理,相比 NL 处理降低了 35.1%(图 1b)。地上部生物量在 NS 处理下最少,低于 CK 但未达到显著,相比 NL 处理显著降低了 30.9%(图 1c),而地下部生物量在 NS 处理下相比 CK, NL, NM 处理显著降低,且 NL 处理下地下部生物量最高(图 1d)。

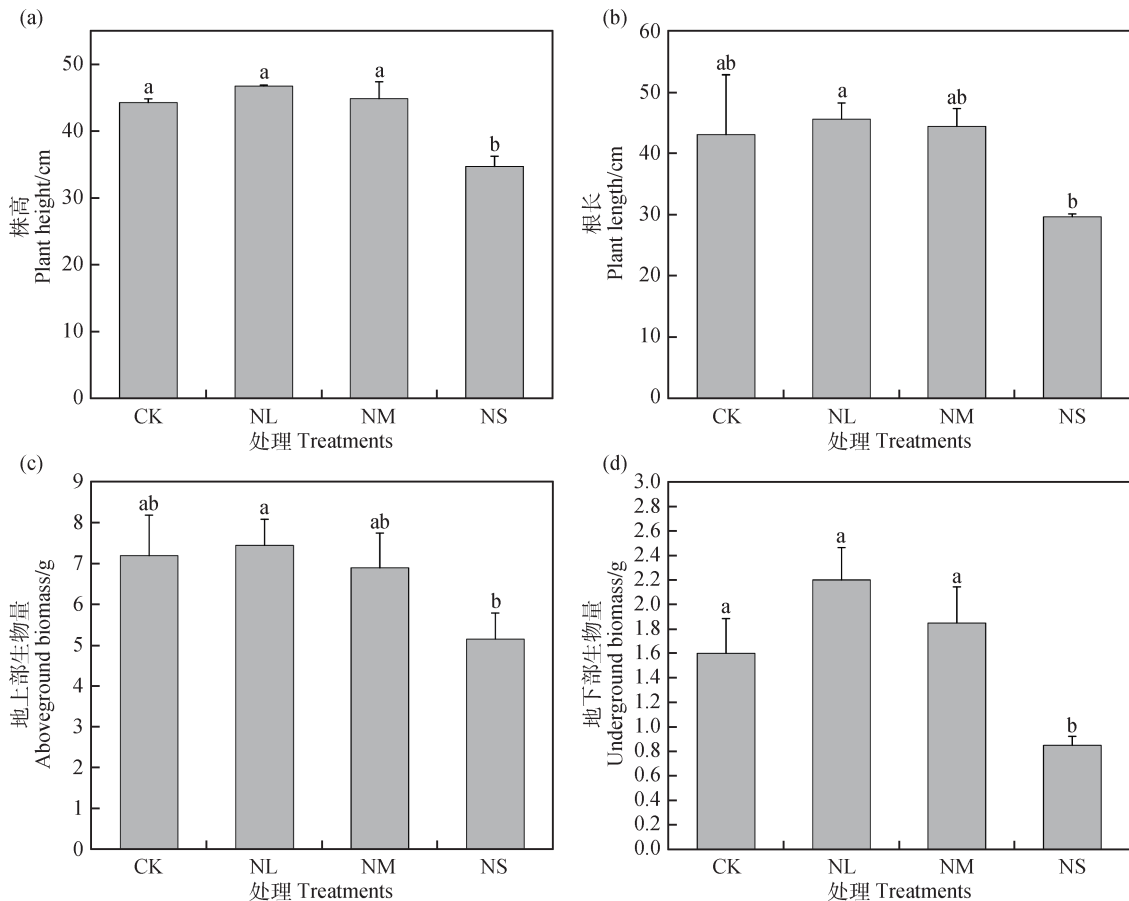


图 1 中性盐胁迫对紫花苜蓿生长指标的影响

Fig. 1 Effects of neutral salt stress on the growth traits of alfalfa

注:不同字母表示组间差异显著($P<0.05$)

Note: Different letters indicate a significant difference between groups ($P<0.05$)

2.1.2 中性盐胁迫下紫花苜蓿的生理响应 如图 2(a)所示, NL, NM, NS 处理下的紫花苜蓿叶和根

中的 Na^+ 含量均显著高于 CK。由图 2(b)可知,紫花苜蓿叶片中的脯氨酸含量在 NL, NM, NS 处理下

均减少,且差异显著;根中的脯氨酸含量随胁迫程度增加而升高,在NL,NM,NS处理下均显著高于CK,且NM处理下含量最高,相比CK升高65.8%。在NL,NM,NS处理下紫花苜蓿叶中可溶性糖含量均高于CK,相比于CK分别增加210.3%,258.6%,143.1%,且NM处理下可溶性糖含量最高;不同处理下根中可溶性糖含量同样显著高于CK,且在NM处理下含量最高,为 $3\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,相比于CK提高193.2%

(图2c)。在NM,NS处理下紫花苜蓿叶中的MDA含量显著高于CK,分别提高71.7%,42.3%;根中的MDA含量在NM处理下显著增加,相比于CK提高59.1%(图2d)。不同处理下紫花苜蓿叶片中的SOD含量均低于CK,在NL,NS处理下差异显著;根中的SOD含量差异不显著(图2e)。NL,NM,NS处理下的紫花苜蓿叶片电导率均高于CK,且NM处理下的叶片电导率与CK差异显著(图2f)。

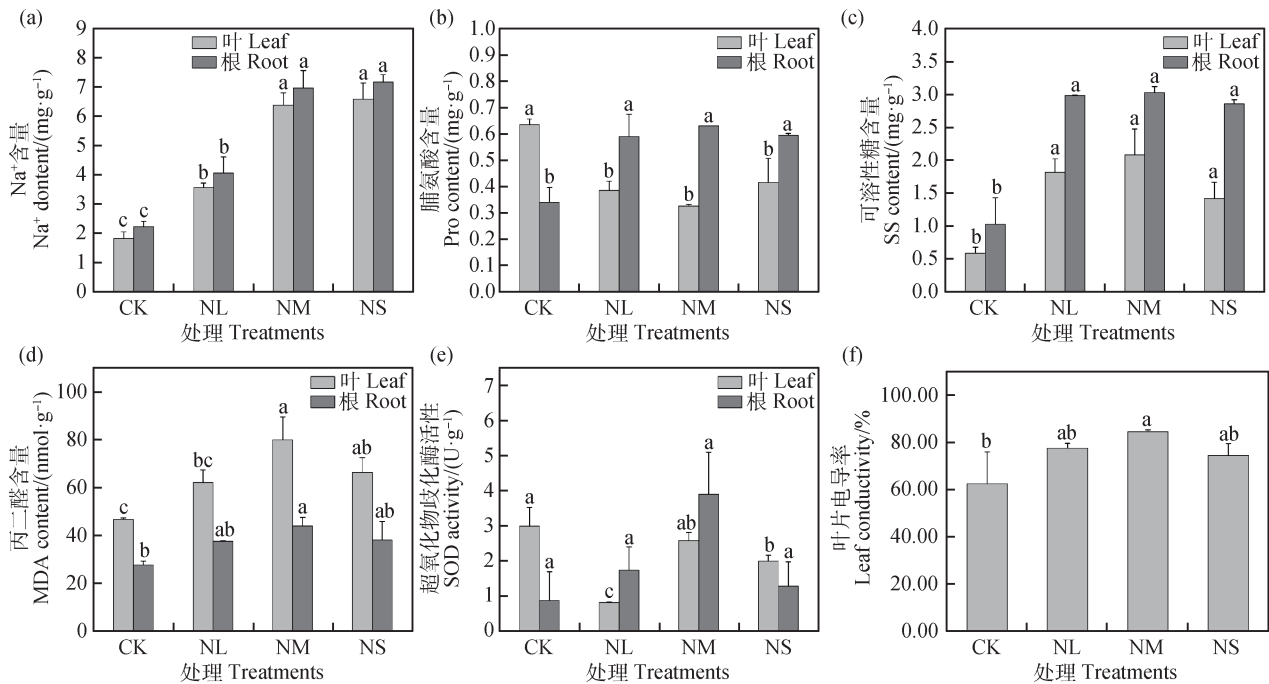


图2 中性盐胁迫对紫花苜蓿生理指标的影响

Fig. 2 Effects of neutral salt stress on the physiological traits of alfalfa

注:不同字母表示组间差异显著($P<0.05$)

Note: Different letters indicate a significant difference between groups ($P<0.05$)

2.2 紫花苜蓿在碱性盐胁迫下的生长和生理响应

2.2.1 碱性盐胁迫下紫花苜蓿的生长变化 在碱性盐胁迫处理下,随胁迫程度增加,紫花苜蓿株高降低,AM,AS处理下的株高显著低于CK,且AS处理的株高显著低于AL(图3a)。三种处理下紫花苜蓿的根长均小于CK,但未达到显著水平(图3b)。地上部生物量在AS处理下最少,显著低于CK(图3c),而地下部生物量在AM处理下相比CK显著降低,减少34.4%(图3d)。

2.2.2 碱性盐胁迫下紫花苜蓿的生理响应 紫花苜蓿叶和根中的 Na^+ 含量在AL,AM,AS处理下均显著高于CK,AS处理下,叶中 Na^+ 含量相比CK升高371.9%,根中 Na^+ 含量相比CK升高262.6%(图4a)。紫花苜蓿叶片中的Pro含量在不同处理均低于CK,而不同处理根中的Pro含量均显著高于CK,且根中Pro含量高于叶中含量(图4b)。叶和根中的

SS在AL,AM,AS处理下含量均显著升高,叶中SS在AS处理下最高,相比CK升高248.3%,而根中SS含量在AM处理下最高,相比于CK提高196.1%,且各处理下紫花苜蓿叶中的SS含量均低于根中含量(图4c)。叶片中MDA含量随胁迫程度增加而增加,AL,AM,AS处理的叶片MDA含量均显著高于CK,相比于CK分别升高77.1%,116.6%,144.9%;根中MDA含量在不同处理均显著升高且在AS处理下含量最高,相比于CK提高94.2%(图4d)。紫花苜蓿叶中SOD含量在AM,AS处理下显著高于CK,分别提高46.6%和82.9%;根中SOD含量在AM处理下显著升高,相比CK提高826.4%(图4e)。碱性盐胁迫下紫花苜蓿叶片电导率随胁迫程度增加呈升高趋势,且在AL和AM处理下差异显著(图4f)。

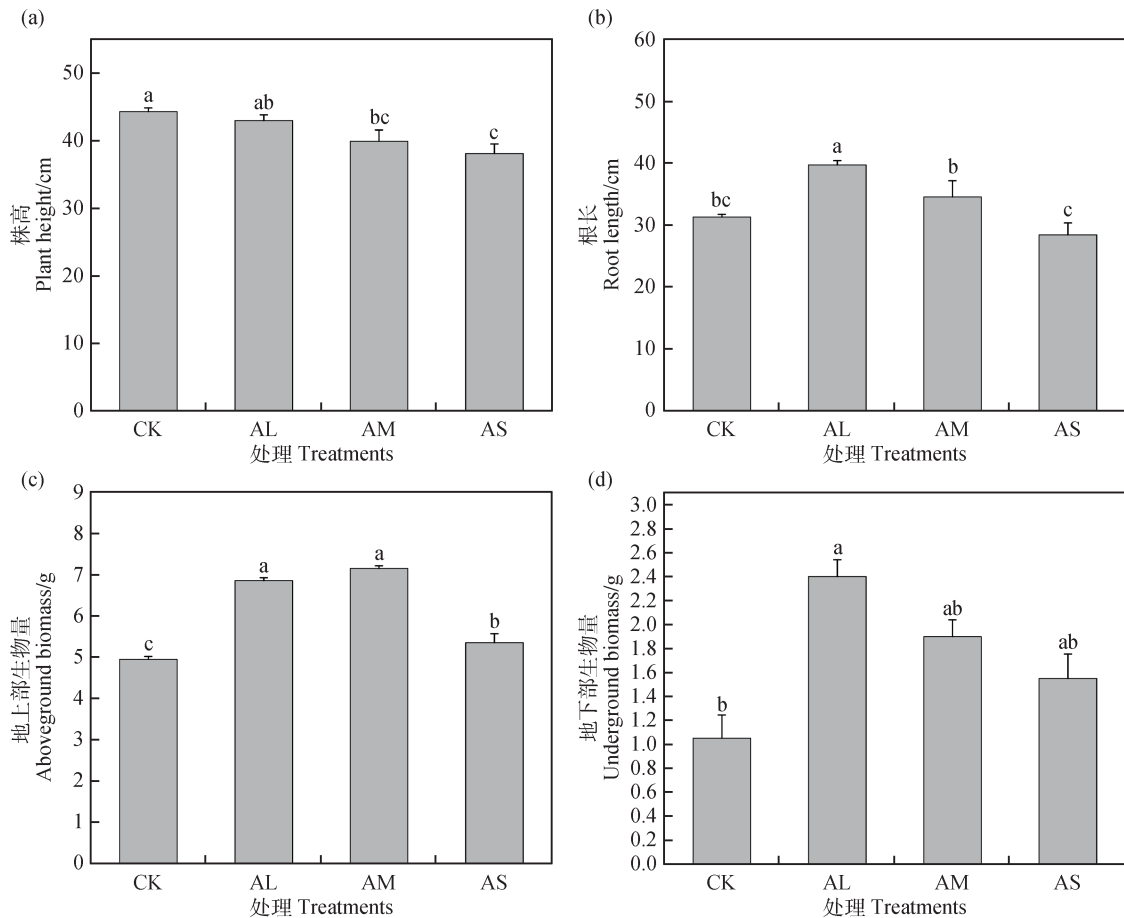


图 3 碱性盐胁迫对紫花苜蓿生长指标的影响

Fig. 3 Effects of alkaline salt stress on the growth traits of alfalfa

注:不同字母表示组间差异显著($P < 0.05$)

Note: Different letters indicate a significant difference between groups ($P < 0.05$)

3 讨论

3.1 不同盐碱胁迫对‘中苜3号’紫花苜蓿生长的影响

生长表型变化是植物应对盐碱胁迫的最直观响应,而根是植物吸收水分和营养物质的主要器官,也是植物最先感知环境变化的器官。本试验中,在中性盐处理下,随着胁迫程度增加,‘中苜3号’紫花苜蓿的株高、根长和地上部/地下部生物量在NS处理下最低,各项表型指标均显著减少(图1a-d)。在碱性盐处理下,除根长外,紫花苜蓿株高、地上部/地下部生物量随着胁迫程度增加而逐渐降低,在AS胁迫下各生长指标与CK相比均受到显著抑制(图3a-d)。

本研究表明在不同盐碱胁迫下,轻度或中度的中性盐胁迫对紫花苜蓿生长没有抑制作用,而不同程度的碱性盐胁迫对紫花苜蓿的生长均有抑制作用,但不论中性盐还是碱性盐,紫花苜蓿在重度胁迫

处理下生长发育都受到显著的抑制。上述结果与于浩然等^[23]研究发现的轻度盐碱地种植的紫花苜蓿草产量高于非、中、重度盐碱地的部分结论存在一致性。但本试验为还原紫花苜蓿在盐碱地实际生长状况,培养基质采用了较多的原土,可能存在土壤对盐溶液的吸收和稀释作用,因此在处理过程中未出现紫花苜蓿严重萎蔫或者发黄死亡的现象,以及部分生长指标和生理响应差异不显著。同时,也进一步表明了‘中苜3号’紫花苜蓿具有良好的耐盐碱性。

3.2 盐碱胁迫下‘中苜3号’紫花苜蓿的生理响应

盐碱土壤环境会对植物细胞造成渗透胁迫和离子毒害,细胞内产生大量活性氧自由基,破坏细胞膜并引起膜透性增大,进而导致氧化胁迫,膜脂、蛋白质和核酸等细胞组分降解,并引起代谢紊乱和组织损伤^[7,24]。本研究中紫花苜蓿叶和根中的 Na^+ 含量在不同程度胁迫处理下均有显著增加,但在重度

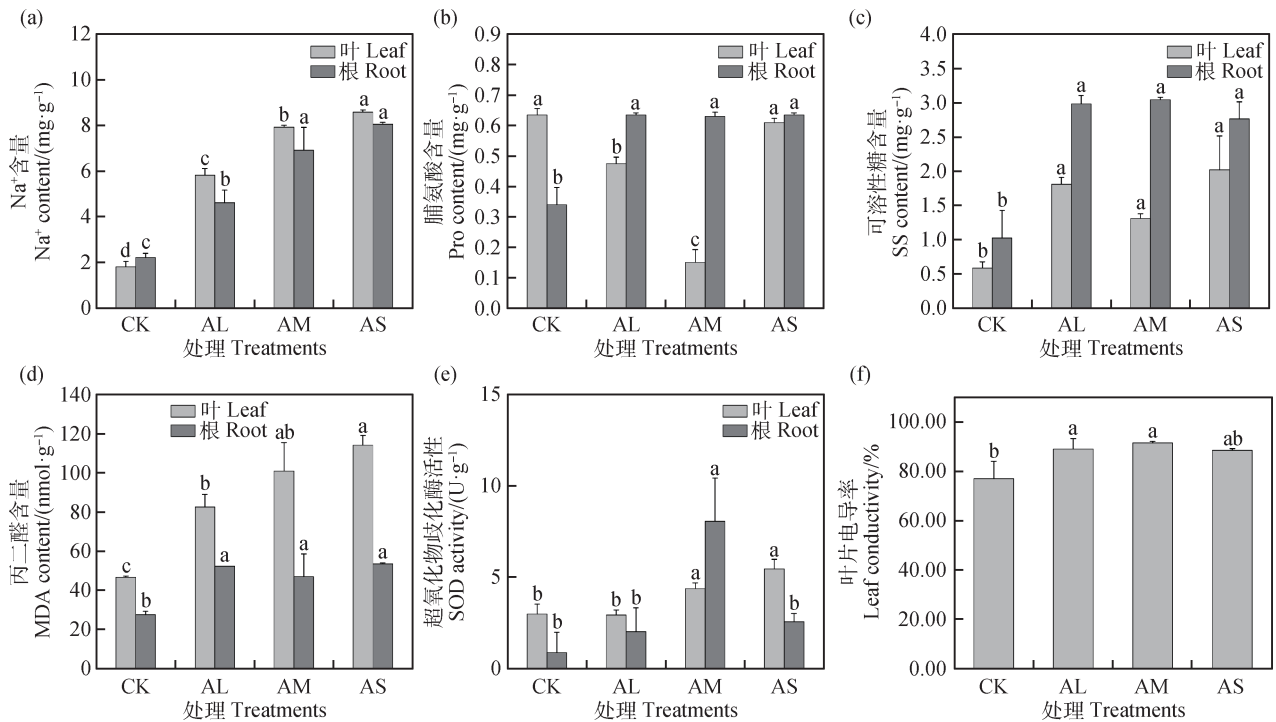


图4 碱性盐胁迫对紫花苜蓿生理指标的影响

Fig. 4 Effects of alkaline salt stress on physiological traits of alfalfa

注:不同字母表示组间差异显著($P < 0.05$)

Note: Different letters indicate a significant difference between groups ($P < 0.05$)

胁迫下 Na^+ 含量没有继续升高,与中度胁迫的 Na^+ 含量无显著差异(图 2a, 4a)。这可能与 Na^+ 转运蛋白参与紫花苜蓿缓解盐胁迫机制相关,从而减轻重度盐碱胁迫对紫花苜蓿造成的离子毒害作用^[25]。MDA 是活性氧(ROS)积累引起的膜脂过氧化产物,对细胞器和质膜具有毒害作用,并破坏蛋白酶的功能^[26],MDA 含量越高,证明其抗逆性越差^[27]。本研究中,紫花苜蓿叶片 MDA 含量在 NM 和 NS 胁迫下显著升高,根中 MDA 含量仅在 NM 胁迫下显著升高;而在碱性盐胁迫下,根和叶中的 MDA 含量在不同胁迫程度下均显著增加(图 2d, 4d),表明碱性盐胁迫对紫花苜蓿生长发育的损伤更显著,叶片电导率结果进一步印证了上述结果(图 2f, 4f)。

Pro 作为一种相容性较强的渗透调节物,在渗透平衡、解除氨毒和保护细胞免受自由基损伤方面发挥着重要作用,从而赋予植物对渗透胁迫以及离子失衡的耐性^[28]。类似地,SS 不仅为植物体内有机物的合成提供物质和能量,还作为一种渗透调节物质参与维持细胞内水分含量,有助于保护质膜和清除活性氧自由基^[29]。研究发现在盐胁迫下,开花期的鹰嘴豆(*Cicer arietinum* L.)茎中注射蔗糖溶液,提高了不同组织中的总糖含量并缓解了盐胁迫对营养生

长和种子繁殖的抑制作用,提升了其耐盐性^[30]。本试验中,叶和根中的渗透调节物质 Pro 与 SS 在不同盐碱胁迫下的响应变化存在差异,叶中 Pro 的含量在中性盐和碱性盐胁迫下均呈现下降或差异变化不显著,而根中的 Pro 含量在不同胁迫下均显著升高。张永峰等^[17]对紫花苜蓿进行 NaCl 和 Na_2CO_3 混合盐胁迫的研究中得出,随着盐浓度增大,紫花苜蓿中 SS、Pro 含量升高。邢晓琳^[31]发现在 50, 100, 200 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaHCO_3 和 NaCl 混合盐碱处理下,紫花苜蓿的 Pro 含量相比对照分别增加 26.21%, 57.40%, 95.26%, 与张永峰等研究结果一致。紫花苜蓿根中的 SOD 含量随着胁迫程度增加呈现先升高后降低的变化,与江超等^[32]对紫花苜蓿苗期根部耐盐碱响应研究所得出的结果一致。在生理响应过程中,紫花苜蓿根中的 SS、Pro 和 SOD 含量在不同盐碱胁迫程度下相对 CK 升高的幅度均大于叶,且含量高于叶中含量,表明‘中苜3号’紫花苜蓿优先通过提高根的渗透调节物质含量和抗氧化能力,以减轻渗透胁迫和离子毒害对细胞质膜、功能蛋白以及核酸的损害,比叶片响应的更为迅速和强烈,以确保根部的发育和存活,根受到的抑制作用更小,这与段小兰等^[33]对紫花苜蓿幼苗期的研究结果一致。

4 结论

本研究中,‘中苜3号’紫花苜蓿在中性和碱性盐胁迫下的生长和生理指标均表现出响应盐碱胁迫的变化,但存在明显差异。轻度或中度的中性盐胁迫对紫花苜蓿生长不存在抑制作用,而在不同程度的碱性盐胁迫下生长均受到抑制,在重度中性盐或碱性盐胁迫下生长发育都受到显著抑制。碱性盐胁迫对紫花苜蓿丙二醛含量和叶片电导率的影响大于中性盐胁迫。根中的可溶性糖、脯氨酸和超氧化物歧化酶含量在不同盐碱胁迫程度下显著升高,且高于叶中积累含量,表明‘中苜3号’紫花苜蓿根部的渗透调节和抗氧化能力强于叶片。

参考文献

- [1] 杨劲松,姚荣江,王相平,等. 中国盐渍土研究:历程、现状与展望[J]. 土壤学报,2022,59(1):10-27
YANG J S, YAO R J, WANG X P, et al. Research on salt-affected soils in China: history, status quo and prospect [J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(1): 10-27
- [2] 王洋,张瑞,刘永昊,等. 水稻对盐胁迫的响应及耐盐机理研究进展[J]. 中国水稻科学,2022,36(2):105-117
WANG Y, ZHANG R, LIU Y H, et al. Rice response to salt stress and research progress in salt tolerance mechanism [J]. Chinese Journal of Rice Science, 2022, 36(2): 105-117
- [3] SHI M Q, LIAO X L, YE Q, et al. Linkage and association mapping of wild soybean (*Glycine soja*) seeds germinating under-salt stress [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2022, 21(10): 2833-2847
- [4] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Status of World Soil Resources: Main Report [EB/OL]. <https://www.fao.org/3/i5199e/i5199e.pdf>, 2015-10-15
- [5] WANG H, TAKANO T, LIU S K. Screening and evaluation of saline-alkaline tolerant germplasm of rice (*Oryza sativa* L.) in soda saline-alkali soil [J]. Agronomy, 2018, 8(10): 205
- [6] ZHANG H L, YU F F, XIE P, et al. A Gγ protein regulates alkaline sensitivity in crops [J]. Science, 2023, 379 (6638): eade8416
- [7] ZHU J K. Abiotic stress signaling and responses in plants [J]. Cell, 2016, 167(2): 313-324
- [8] 李俊伟. 燕麦对盐胁迫和碱胁迫的响应机制[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023: 1-2
LI J W. The mechanism of Oat response to salt stress and alk [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023: 1-2
- [9] SKAGGS R W, SCHILFGAARDE J V, OSTER J D, et al. Reclamation of salt affected soils [M]. Wageningen: Agricultural Drainage, 1999: 65
- [10] 李强,周道玮. 草地管理对土壤碳截获的影响[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(23): 1-5, 8
LI Q, ZHOU D W. Effect of grassland management on soil carbon sequestration [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2018, 46(23): 1-5, 8
- [11] 景海春,王台,林荣呈,等. 加强饲草基础生物学研究,保障饲草种业与国家大粮食安全[J]. 植物学报, 2022, 57(6): 719-724
JING H C, WANG T, LIN R C, et al. Strengthen the research of forage basic biology to ensure forage seed industry and national food security [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2022, 57(6): 719-724
- [12] 杨青川,孙彦. 中国苜蓿育种的历史、现状与发展趋势[J]. 中国草地学报, 2011, 33(6): 95-101
YANG Q C, SUN Y. The History, Current situation and development of alfalfa breeding in China [J]. Chinese Journal of Grassland, 2011, 33(6): 95-101
- [13] 刘铎,白爽,杨庆山,等. 紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 耐盐碱研究进展[J]. 生物学杂志, 2021, 38(1): 98-101, 105
LIU D, BAI S, YANG Q S, et al. A review on the saline-alkaline tolerance of alfalfa (*Medicago sativa* L.) [J]. Journal of Biology, 2021, 38(1): 98-101, 105
- [14] 杨青川,孙杰,康俊梅,等. 耐盐苜蓿“中苜3号”新品种的选育与应用[Z]. 内蒙古自治区农牧业科学院;中国农业科学院北京畜牧兽医研究所, 2019-10-10
YANG Q C, SUN J, KANG J M, et al. Breeding and application of a new salt-tolerant alfalfa variety ‘Zhongmu No. 3’ [Z]. Inner Mongolia Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences; Institute of Animal Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019-10-10
- [15] ZHANG Y G, ZHANG Y, WANG C, et al. Enhancement of salt tolerance of alfalfa: physiological and molecular responses of transgenic alfalfa plants expressing *Syntrichia caninervis*-derived *ScABI3* [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2024 (207): 108335
- [16] 王晓春,杨天辉,王川,等. 混合盐碱胁迫对紫花苜蓿的生长和生理指标的影响[J]. 中国农学通报, 2022, 38(19): 139-145
WANG X C, YANG T H, WANG C, et al. Effects of mixed saline-alkali stress on growth and physiology of Alfalfa [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(19): 139-145
- [17] 贾秀峰,李波. NaHCO₃+Na₂CO₃复合盐碱胁迫对苜蓿幼苗生理代谢的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2021(23): 99-103
JIA X F, LI B. Effects of NaHCO₃+Na₂CO₃ combined saline alkali stress on physiological metabolism of alfalfa seedlings [J]. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2021 (23): 99-103
- [18] 张永峰,殷波. 混合盐碱胁迫对苗期紫花苜蓿抗氧化酶活性及丙二醛含量的影响[J]. 草业学报, 2009, 18(1): 46-50
ZHANG Y F, YIN B. Influences of salt and alkali mixed stresses on antioxidative activity and MDA content of *Medicago sativa* at seedling stage [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2009, 18(1): 46-50
- [19] 朱晨晨,史昆,何沁坤,等. 混合盐碱胁迫对紫花苜蓿幼苗生

- 理和基因表达的影响[J]. 草地学报, 2024, 32(4):1044-1054
- ZHU C C, SHI K, HE Q K, et al. Effects of mixed saline-alkali stress on physiology and gene expression of Alfalfa seedlings[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(4):1044-1054
- [20] HOU Z, ZHAO L, WANG Y, et al. Purification and characterization of superoxide dismutases from sea buckthorn and chestnut rose[J]. Journal of food science, 2019, 84(4):746-753
- [21] VIEIRA S M, SILVA T M, GLÓRIA M B A. Influence of processing on the levels of amines and proline and on the physico-chemical characteristics of concentrated orange juice[J]. Food chemistry, 2010, 119(1):7-11
- [22] 国家卫生健康委员会. GB 5009. 268-2016 食品安全国家标准食品中多元素的测定[S]. 北京:中国标准出版社, 2016:16
- National Health Commission. GB 5009. 268-2016 National food safety standard-determination of multiple elements in foods[S]. Beijing: China Standards Press, 2016:16
- [23] 于浩然, 贾玉山, 贾鹏飞, 等. 不同盐碱度对紫花苜蓿产量及品质的影响[J]. 中国草地学报, 2019, 41(4):143-149
- YU H R, JIA Y S, JIA P F, et al. Comprehensive evaluation of growth, yield and quality of alfalfa in different saline-alkali soil[J]. Chinese Journal of Grassland, 2019, 41(4):143-149
- [24] FANG S, HOU X, LIANG X. Response mechanisms of plants under saline-alkali stress[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 4(12):667458
- [25] 朱晨晨, 史昆, 何沁坤, 等. 中苜一号紫花苜蓿幼苗对混合盐碱胁迫的响应[J]. 中国草地学报, 2024, 46(8):1-9
- ZHU C C, SHI K, HE Q K, et al. Response of ‘Zhongmu No. 1’ alfalfa seedlings to mixed saline-alkali stress [J]. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(8):1-9
- [26] GILL S S, TUTEJA N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2010, 48(12):909-930
- [27] 沈英英, 杨雨薇, 李晓彤, 等. 不同非生物胁迫对紫花苜蓿 WL712 幼苗生长和生理特性的影响[J]. 中国草地学报, 2024, 46(1):78-86
- SHEN Y Y, YANG Y W, LI X T, et al. Effect of various abiotic stresses on growth and physiological characteristics of alfalfa (*Medicago sativa* L.) WL712 seedlings [J]. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(1):78-86
- [28] ASHRAF M, FOOLAD M R. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance[J]. Environmental and Experimental Botany, 2007, 59(2):206-216
- [29] 王伶珍, 刘倩, 高娅妮, 等. 植物对盐碱胁迫的响应机制研究进展[J]. 生态学报, 2017, 37(16):5565-5577
- WANG Q Z, LIU Q, GAO Y N, et al. Review on the mechanisms of the response to salinity-alkalinity stress in plants[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(16):5565-5577
- [30] KHAN H A, SIDDIQUE K H M, COLMER T D. Vegetative and reproductive growth of salt-stressed chickpea are carbon-limited: sucrose infusion at the reproductive stage improves salt tolerance [J]. Journal of Experimental Botany, 2017, 68(8):2001-2011
- [31] 江超, 夏阳, 杨克强. 盐胁迫下紫花苜蓿苗期根部生长及生理特性研究[J]. 北方园艺, 2014(5):68-72
- JIANG C, XIA Y, YANG K Q. Research on the root physiological characteristics of *Medicago sativa* L. seedling under salt stress[J]. Northern Horticulture, 2014(5):68-72
- [32] 邢晓琳. 外源脯氨酸和水杨酸对盐碱胁迫下紫花苜蓿生理特性及抗氧化酶基因表达的影响[D]. 沈阳:辽宁大学, 2021:17-18
- XING X L. Effects of exogenous proline and salicylic acid on physiological characteristics and antioxidant enzyme gene expression of alfalfa under saline-alkali stress [D]. Shenyang: Liaoning University, 2021:17-18
- [33] 段小兰, 朱建峰, 李伟, 等. 盐胁迫下紫花苜蓿萌发期和幼苗期代谢组学分析[J]. 中国草地学报, 2024, 46(2):35-47
- DUAN X L, ZHU J F, LI WEI, et al. Metabolomic analysis of *Medicago sativa* at germination and seedling stage under salt stress[J]. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(2):35-47

(责任编辑 付 宸)