

DOI: 10.19462/j.cnki.zgzy.20250822001

# 耐盐性牧草研究进展

于雪然 娜日苏 杨秀芳 于洋 梁庆伟

(内蒙古赤峰市农牧科学院, 赤峰 024031)

**摘要:**牧草作为家畜食用的重要草本植物在世界多地广泛种植,因其较高的营养价值及经济价值备受关注。盐胁迫会对牧草生长发育的各个阶段造成严重影响,改变生理特性及生产性能,导致产量损失、营养性能下降。利用分子育种技术加速培育耐盐性牧草新品种是应对盐胁迫的有效手段,然而目前针对牧草耐盐性的遗传研究基础相对薄弱。通过总结盐胁迫对主要牧草生理功能、生理特性、生产性能的影响,并梳理近年来在主要牧草耐盐性遗传研究方面所取得的进展,旨在为牧草耐盐性育种提供参考依据。

**关键词:**牧草;盐胁迫;耐盐性;生理特性;遗传特性

## Research Progress of Salt-tolerant Forage Grass

YU Xueran, NARI Su, YANG Xiufang, YU Yang, LIANG Qingwei

(Chifeng Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Chifeng 024031, Inner Mongolia)

盐碱地是指由人为或自然原因造成含有较高浓度的可溶性盐分离子等特殊土壤<sup>[1]</sup>。目前,全球的盐碱地面积已达 9.5 亿 hm<sup>2</sup>,分布范围广泛<sup>[2]</sup>。我国现存盐碱地总面积达 3690 万 hm<sup>2</sup>,其中可开发潜力面积约占全国可利用土地资源的 4.88%<sup>[3]</sup>。这类土地因高盐、高 pH 值导致生态服务功能丧失,土壤地力下降,影响植物生长,给农业生产带来巨大的经济损失。合理开发此类边际土地资源,对保障国家粮食安全、实现“藏粮于地”战略具有重大意义。土壤盐碱化作为全球性生态问题,直接导致植被覆盖

度降低、作物减产及耕地利用率受限等连锁反应<sup>[4]</sup>。草本植物中的牧草作为盐碱地生态植被重要的组成部分,对于盐碱地的改良修复起到重要作用<sup>[5]</sup>,可作为当前盐碱地改良利用可行性的生物修复方案。

现代畜牧业发展中,牧草作为基础性饲料资源展现出显著的饲用价值<sup>[6]</sup>。优质牧草不仅能提高反刍动物的营养摄入水平,更能通过优化饲料结构显著提升养殖效益<sup>[7]</sup>。特别是其种植适应性强的特点<sup>[8]</sup>,使其成为农牧区防灾减灾的战略性资源。研究表明,采用“混播草地划区轮牧”系统可显著提升生产效率<sup>[9]</sup>。牧草系统具有土壤改良、气候调节及环境响应等多重生态效益,从经济、农业、生态层面

基金项目:国家牧草产业技术体系赤峰站(CARS-34-30)  
通信作者:梁庆伟



(S1):99-101

[10] 国际种子检验协会, 种子健康检测技术标准. (2025-01-01) [2025-09-09]. <https://www.seedtest.org/en/international-rules-for-seed-testing/seed-health-methods-product-1068.html>

[11] 国际种子联盟, 种子健康检测方法. [2025-09-09]. <https://worldseed.org/our-work/seed-health/ishi-methods/>

[12] 国际植保公约, 植物检疫相关技术标准. [2025-09-09]. <https://www.ippc.int/zh/core-activities/standards-setting/ispsms/>

[www.ippc.int/zh/core-activities/standards-setting/ispsms/](https://www.ippc.int/zh/core-activities/standards-setting/ispsms/)

[13] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 3543. 1—2025 农作物种子检验规程 第 1 部分: 总则. 北京: 中国标准出版社, 2025

[14] 刘慧, 朱莉, 赵守岐, 宋震. 警惕番茄褐色皱果病毒传入我国. 中国植保导刊, 2019, 39 (8): 73-76, 82

(收稿日期: 2025-09-09)

展现出独特的多元价值<sup>[10]</sup>。在盐碱地种植不同种类的牧草,能显著提高盐碱地的土壤孔隙度,有效缓解土壤有机质的流失,且种植的牧草产量相对提高<sup>[8]</sup>。目前,我国缺少适宜盐碱地生长的抗逆性较强的牧草品种,高质量牧草品种主要依赖进口,因此,加强对耐盐碱牧草新品种的研究对我国盐碱地资源的利用以及畜牧业的发展极为重要,本文对近些年来牧草耐盐性的研究进展进行综述,以期对相关领域提供一定的参考。

### 1 盐胁迫对牧草生理功能的影响

研究表明,盐胁迫下细胞质膜被破坏致使丙二醛(MDA)含量和过氧化物酶(POD)含量呈现出不同程度的变化,植物通过积累可溶性糖和可溶性蛋白维持细胞渗透势<sup>[11-12]</sup>。可溶性糖和可溶性蛋白含量显著升高,质膜受损导致丙二醛和过氧化物酶含量出现不同程度的变化。随着盐浓度的增加,叶片中的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶、过氧化氢酶(CAT)活性及丙二醛含量均呈上升趋势<sup>[13]</sup>,离子转运蛋白提高减轻细胞膜、胞内蛋白及核酸分子受到的氧化损伤,并参与调控ABA等植物激素信号途径,激活植物一系列胁迫应答反应<sup>[14]</sup>。其中,脯氨酸作为核心渗透调节剂,调解幼苗叶和根系的渗透平衡,清除盐胁迫所积累的活性氧及蛋白质分解产生的有毒物质,以减少盐离子带来的伤害<sup>[15]</sup>。

### 2 盐胁迫下牧草的生理特性变化

当前,植物的抗盐机制已成为研究热点。植物的根系是首个感知土壤盐分变化的部位。面对盐胁迫,根系会采取多种应对策略。研究表明,盐胁迫会引起根系有机酸分泌减少,改变根系水势,干扰营养物质的吸收,导致有毒物质迅速积累,影响木质素的合成及细胞壁的发育,进而导致总根长和根尖数量下降,最终影响牧草的光合作用和根系的整体发育<sup>[16-18]</sup>。

植物细胞在正常代谢过程中,叶片中的活性氧清除系统发挥着关键作用,能够有效抵消逆境胁迫造成的氧化损伤,维持细胞内活性氧的动态平衡<sup>[19]</sup>。当遭受盐胁迫时,多数植物表现出典型的生理响应特征,包括光合作用效率显著降低、呼吸代谢受抑制、净光合速率持续下降,最终导致生长速率明显减缓<sup>[20]</sup>。对中华结缕草的研究发现,其

维管系统在盐胁迫下会发生适应性重构,具体表现为导管直径缩小、导管数量减少以及维管柱结构改变<sup>[21]</sup>。值得注意的是,土壤盐碱化会诱导紫花苜蓿发生形态学适应,其叶片上表皮蜡质层和茎皮层显著增厚,同时伴随气孔面积减小但密度增加的复合响应,这种结构变化有效降低了水分蒸腾损失<sup>[22]</sup>。在羊草的研究中,研究人员发现,在恒定光照条件下,随着土壤盐碱浓度的梯度升高,其光合速率和蒸腾速率呈现同步下降趋势,而水分利用效率则显著提升<sup>[23]</sup>。

### 3 盐胁迫对牧草生产性能的影响

大部分植物对盐胁迫都较为敏感。多项研究表明,盐分增加会影响植物的根系、叶片、茎秆等部位,降低植物吸收水和必需矿物质的能力,导致植物的产量及其营养成分的形成受限,严重影响植物的生长性能<sup>[24-25]</sup>。

**3.1 盐胁迫对产量的影响** 随着畜牧业的持续发展,饲草资源的需求量日益增加。截至2025年,我国草产品的进口需求依然较大。探究盐胁迫对牧草产量的影响,能够为饲草产量提升提供科学的理论依据。于浩然等<sup>[26]</sup>研究发现,中度及重度盐碱会导致苜蓿产量下降,而轻度盐碱则显著提升了紫花苜蓿草的产量。Valizadeh等<sup>[27]</sup>的研究表明,中度盐胁迫会降低苜蓿的株高、叶片和茎质量,进而迫使相对生长率下降。郑译儒等<sup>[28]</sup>的研究发现,在播种至出苗期阶段,盐地碱蓬的株高增长量随灌溉水盐度的升高而显著减少;在出苗至成苗阶段,株高净增长量随盐浓度增加呈现出先降低、再升高、后降低的趋势;在播种至成苗阶段,地上部鲜重净积累量随盐浓度增加呈下降趋势,干重净积累量也随盐浓度的增加而降低。

**3.2 盐胁迫对营养成分的影响** 土壤盐碱化会影响紫花苜蓿生长过程中营养物质的积累,导致蛋白质含量提升<sup>[29]</sup>。随着盐浓度变化,粗蛋白(CP)、酸性洗涤纤维(ADF)及中性洗涤纤维(NDF)的含量也会相应改变,其中重度盐碱地紫花苜蓿的营养品质优于轻度和中度盐碱地<sup>[22]</sup>。于浩然等<sup>[26]</sup>通过研究盐碱地紫花苜蓿的营养品质发现,中度和重度盐碱化对紫花苜蓿NDF、ADF的含量具有抑制作用。李源等<sup>[30]</sup>对紫花苜蓿种质耐盐性及其在盐胁迫下的生理反应进行综合评价,发现随着盐碱化程度的

加剧,苜蓿可溶性糖含量逐渐上升。史金红等<sup>[31]</sup>研究表明,盐胁迫对紫花苜蓿碳水化合物含量有调控作用,使紫花苜蓿在重度盐碱地淀粉含量呈增加趋势,且粗脂肪含量及总脂肪酸含量会随盐碱离子浓度的变化而变化,这主要是由于盐离子对酶活性的不同影响所致。

#### 4 牧草遗传研究

过量盐分在植物生长的过程中具有阻碍作用。现有大量的研究表明盐胁迫基因可参与盐的吸收转运及分配,深入研究其分子机制及其基因,可为培育耐盐牧草奠定理论基础。基于此,国内外研究学者对盐胁迫基因进行了深入研究。

李倩等<sup>[32]</sup>研究克隆得到的羊草 *LcCBF6* 基因,通过组织特异性表达模式分析表明,该基因在羊草的根、叶、种子中均有表达,并在提高盐胁迫抗逆性方面发挥重要作用。张然等<sup>[17]</sup>通过对长穗偃麦草的转录组学分析,筛选出 13 条与离子结合相关的耐盐候选基因,并针对离子结合通路进行了重要耐盐候选基因的筛选,发现 *STRK1* 基因显著差异表达。在对水稻中的研究发现,*STRK1* 基因可通过磷酸化和激活 CatC 调节体内  $H_2O_2$  平衡,从而改善盐胁迫及氧化胁迫的耐受性<sup>[33]</sup>。林杉<sup>[34]</sup>通过对共表达 *ZxNHX1* 和 *PcCLCg* 基因的分析,评估了转基因紫花苜蓿的生长情况,并测定了  $Na^+$  和  $Cl^-$  在液泡中的积累,结果表明其耐盐性得到增强。包爱科<sup>[35]</sup>通过遗传转化,获得 *AVPI* 在紫花苜蓿中超表达的植株,*AVPI* 通过大量积累  $Na^+$ 、 $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ ,在干旱或盐胁迫下维持渗透压,保持水分,从而增强转基因紫花苜蓿的耐盐抗旱能力。贾姝<sup>[36]</sup>以红豆草为材料,在探究其对盐胁迫的生理响应基础上,采用根癌农杆菌介导法将甜菜 *BvNHX* 基因转入红豆草,并对其耐盐性进行分析,发现超表达 *BvNHX* 显著提高了红豆草的耐盐性。Gou 等<sup>[37]</sup>研究发现,在紫花苜蓿中,通过 RNAi 介导的 *MsSPL8* 基因下调,植株表现出对干旱和盐胁迫的耐受性。刘倩<sup>[38]</sup>通过在拟南芥和水稻中过表达 *LcbZIP46*,筛选并验证了 *LcbZIP46* 与互作蛋白及下游靶基因的结合,系统性地探究了 *LcbZIP46* 响应盐碱胁迫的分子机制;研究结果显示,*LcbZIP46* 在羊草的多个器官中均有表达,尤其在幼穗和叶片中的表达量显著高于其他组织;*LcbZIP46* 受多种胁迫影响,尤其对盐碱胁迫

表现出强烈的诱导反应。Zhang 等<sup>[39]</sup>通过过表达 *RCI2* 基因家族成员 *MsRCI2D* 和 *MsRCI2E*,增强了细胞膜的稳定性和抗氧化酶的活性,从而显著提高了紫花苜蓿的耐盐性。国内外学者在牧草耐盐基因领域进行了深入且系统的研究,从多个角度揭示了遗传转化对牧草生理特性的影响机制,为牧草的遗传改良和农业生产提供了坚实有力的科学支撑。

#### 5 问题与展望

目前,这些研究不仅为牧草在盐碱地种植提供了坚实的理论依据,也为遗传改良耐盐性开辟了新的思路。然而,耐盐性的研究仍面临诸多挑战,例如缺乏耐盐的优质草品种,且耐盐机制尚未完全阐明。因此,未来研究需进一步深入探索耐盐性的生理与分子机制,同时借助现代生物技术和遗传工程手段,培育更多具备优良耐盐碱特性的草品种,从而更有效地利用盐碱地资源,推动畜牧业的持续发展。

**5.1 丰富研究手段** 耐盐性牧草在提高土壤利用率、保障畜牧业发展等方面扮演着重要角色。然而,由于我国土地资源丰富且类型复杂,不同种牧草的耐盐能力差异显著,导致盐碱地大面积推广种植牧草面临困难。目前,牧草育种主要依赖常规杂交育种和选择育种等传统手段,而分子标记辅助育种和转基因育种的应用较少,这显著延长了育种周期。牧草自身的特性使得育种研究面临诸多挑战<sup>[40]</sup>:首先,多数牧草作物采用异花授粉,自交不亲和,严重阻碍了自交制种和杂交育种的进展;其次,饲用牧草基因组具有多倍体化、高杂合度等特点,且体量大、重复序列多,解析难度极大。目前,仅有美国通过抗除草剂草甘膦转基因苜蓿品种和低木质素基因苜蓿品种,成功培育了 200 余个新品种<sup>[41]</sup>。

与粮食作物相比,饲草基因组研究相对滞后。目前,国内外针对牧草耐盐性品种的研究主要采用直接鉴定和间接鉴定两种方式。然而,田间鉴定方法存在育种周期长、投入成本高等问题。因此,利用现有的分子辅助标记育种、基因工程等技术,加强对牧草新品种的研发,加速高通量测序与拼接技术软件的更新迭代,有效降低测序成本,对牧草多倍体基因组进行有效编辑与优化,建立精准智能育种新体系<sup>[42]</sup>,通过科研院所与企业的联合,加速成果转化,提升育种进程,显得尤为必要。未来,需借助大数据技术与人工智能的深度融合,通过信息技术手段加

速设计智能育种技术,缩短研究周期,有效利用新型育种技术,挖掘与牧草耐盐性相关的遗传变异位点的有效方法,将是推动牧草基因组研究发展的必由之路。

**5.2 加强种质资源的保护** 目前,我国的草种质资源主要采用异地保护的方式。这种做法虽然能够降低保存成本,有效保护物种的多样性,但随着存储时间的延长,不可避免地会出现数量减少、种质活力下降等一系列问题<sup>[43]</sup>。为实现种质资源的有效保护,首先应加大对重点属种的保护力度。通过深入研究我国重点属种的分布区域及其生存条件,针对当前收集现状,积极开展专属种收集工作,从而提升属种的系统收集水平。其次,必须加强对牧草种质资源原生环境的保护,维护种质资源原有的生态环境是保存其遗传多样性和确保遗传进化途径的必要手段。

**5.3 农艺措施提高抗逆性** 除了开发耐盐性品种之外,提升不同品种的抗逆能力也是一种行之有效的策略。通过施加外源生长物质,可以显著提高牧草的抗逆性,增强抗氧化酶的活性,从而有效减轻盐胁迫所造成的损害。

研究表明,褪黑素对盐碱胁迫下的苜蓿种子发芽起缓解作用,能提高幼苗耐盐碱能力,包括增加盐胁迫下的渗透调节物质、增强抗氧化酶系统、调节离子稳态、清除活性氧等,可缓解盐胁迫给苜蓿幼苗带来的影响<sup>[44]</sup>;吡啶丁酸钾有效缓解由盐害造成的植株株高、单株鲜重及根系生长发育受限的影响,改善植株生长指标,促进生长发育,增强植株的稳定性和抗逆性<sup>[45]</sup>;一氧化氮显著提高了耐盐碱胁迫能力,增强幼苗抗氧化酶活性,减轻盐碱胁迫造成的氧化损伤<sup>[46]</sup>;水杨酸处理对盐胁迫下叶片的蒸腾速率、光合作用、水分利用及根系导管等造成影响,显著增加抗氧化酶活性,降低代谢过程中的过氧化物的作用,保证正常代谢过程,以此降低盐胁迫带来的影响<sup>[47]</sup>。

**5.4 盐碱地土壤改良** 盐碱地在我国粮食安全、环境治理和生态保护方面扮演着重要角色。众多作物依赖于盐碱地生长,然而,由于我国盐碱地面积广阔、类型多样,不同地区土壤中的盐碱离子含量存在显著差异。因此,针对盐碱地的研究可以从以下几个层面进行加强。

一是通过传统耕作方式改善盐碱地的土壤结构,采用多样化的轮作模式对土壤进行改良,调节土壤水盐运动,有效抑制土壤盐分的上升;二是利用化学调理手段实现酸碱平衡,通过施用富含钙离子、生物炭等有机肥料,中和土壤中的酸碱离子,改变土壤水分特性,从而消除潜在危害;三是进行生物改良,通过在盐碱地上种植特定植物,提升植物的抗逆能力,同时借助植物根系生长或吸收盐分,增强土壤酶活性;四是充分发挥技术优势,加强理论、模型与软件设备的融合,结合大数据智能分析,针对不同地区进行精准诊断,制定综合改良方案,综合运用物理、化学和生物手段,全面提升盐碱地质量。

#### 参考文献

- [1] 余贝, 王志海, 符冠富. 盐胁迫影响水稻生理特性及其调控机理研究进展. 作物研究, 2023, 37 (2): 189-198
- [2] 武晋民, 白小龙, 张恩, 张邦彦, 张百含, 刘盼婷, 田丰, 赵卉, 王彬. 改良物料投入对内蒙盐碱地土壤理化性状、玉米光合特性及产量的影响. 西北农业学报, 2025, 34 (8): 1467-1475
- [3] 邢起铭, 金文杰, 周利斌, 李文建, 刘瑞媛, 马建忠. 植物根际促生菌提高植物耐盐性的研究进展. 中国农学通报, 2022, 38 (11): 46-52
- [4] 吴盼盼, 李剑峰, 朱增银, 王楠. 滨州市耐盐碱作物种质资源综合利用现状及发展对策研究. 中国种业, 2024 (1): 48-51
- [5] 王娅琳, 魏琳, 李娜, 张骞, 常涛, 罗崇亮, 赵娜, 徐世晓. 3种牧草种子萌发期耐盐性综合评价. 草业科学, 2023, 40 (12): 3104-3113
- [6] 刘定鑫, 彭文栋, 武育芳, 伏兵哲, 马锋茂, 张秀红, 贺彦玲. 干旱区7个禾本科牧草品种生产性能与饲用价值评价. 草原与草坪, 2024, 44 (3): 108-115
- [7] 王瑞港, 赵金标, 程广燕. 发展饲草产业对保障粮食安全的贡献与潜力研究. 中国畜牧杂志, 2024, 60 (7): 351-356
- [8] 鄂继芳, 杨树青, 张万锋, 张晶, 郑彦, 胡玲玲. 暗管条件下牧草种植对农牧交错区盐渍土的改土效应. 农业机械学报, 2024, 55 (9): 402-410
- [9] 梁庆伟, 娜日苏, 张晴晴, 杨秀芳, 潘祥磊, 高明文, 乌英嘎, 巴图巴根. 节水灌溉混播人工草牧场划区轮牧模式综述. 饲料研究, 2019, 42 (10): 90-93
- [10] 景鹏成, 王树林, 陈乙实, 鲁为华, 马春晖. 耐盐牧草对南疆地区盐渍土的适应和改良研究. 草业学报, 2017, 26 (10): 56-63
- [11] 于莹, 王傲雪, 徐香玲. NaCl胁迫下羊草生理生化特性的初步研究. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2007, 23 (1): 96-99
- [12] 张晓倩, 王康才, 张彦南, 王乾, 崔志伟. 水飞蓟萌发期和苗期对盐胁迫的生长生理响应. 西北植物学报, 2013, 33 (10): 2050-2056
- [13] 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. 草业学报, 2009, 18 (1): 46-50
- [14] 胡雅丹, 伍国强, 刘晨, 魏明. MYB转录因子在调控植物响应逆境胁迫中的作用. 生物技术通报, 2024, 40 (6): 5-22

- [15] 谷蕊. 海乳草耐盐基因的功能验证及其在苜蓿中的遗传转化研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023
- [16] Liu W, Li R J, Han T T, Cai W, Fu Z W, Lu Y T. Salt stress reduces root meristem size by nitric oxide-mediated modulation of auxin accumulation and signaling in Arabidopsis. *Plant Physiology*, 2015, 168 (1): 343-56
- [17] 张然, 刘琛琛, 苑峰, 刘亚玲, 董笛, 王思宁, 邹博坤, 李晓霞. 长穗偃麦草响应  $\text{NaHCO}_3$  胁迫的离子平衡机制及转录组分析. 草业学报, 2025, 34 (10): 174-186
- [18] 张冉, 杨亮, 李丹, 李彦颖, 卢英帅, 陈晓鹏. 盐胁迫对长穗偃麦草根分泌有机酸的影响. 草地学报. <https://link.cnki.net/urlid/11.3362.S.20250723.1721.004>
- [19] 刘银萍. ‘洛阳红’花期花瓣抗氧化酶 SOD、POD 和 CAT 活性的研究. 河南林业科技, 2020, 40 (3): 13-15, 41
- [20] 凌云鹤. 银叶向日葵响应盐胁迫的形态及生理机制的初步研究. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019
- [21] 鲁松. 盐胁迫对中华结缕草的叶片结构及盐腺发育的影响. 济南: 山东师范大学, 2006
- [22] 撒多文. 盐碱地紫花苜蓿刈割后营养品质变化特征与真菌群落结构研究. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021
- [23] 黄立华, 梁正伟, 马红媛. 苏打盐碱胁迫对羊草光合、蒸腾速率及水分利用效率的影响. 草业学报, 2009, 18 (5): 25-30
- [24] 陈计芳. 盐胁迫下丛枝菌根真菌对小麦叶部蛋白组的影响. 太原: 山西师范大学, 2018
- [25] Munns R, James R A, Lauchli A. Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals. *Journal of Experimental Botany*, 2006, 57 (5): 1025-1043
- [26] 于浩然, 贾玉山, 贾鹏飞, 连直, 卢强, 李俊峰, 王志军, 任志花. 不同盐碱度对紫花苜蓿产量及品质的影响. 中国草地学报, 2019, 41 (4): 143-149
- [27] Valizadeh M, Moharamnejad S, Ahmadi M, Jaiaily H M. Changes in activity profile of some antioxidant enzymes in alfalfa half-sib families under salt stress. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2013, 15: 801-809
- [28] 郑译儒, 赵俊超, 龚东芳, 王金刚.  $\text{NaHCO}_3$  和  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  胁迫对碱茅和披碱草种子萌发、幼苗生长和生理指标的影响. 中国科学院大学学报, 2021, 38 (2): 228-239
- [29] Reyhaneh F E, Parvaneh R, Hassan S V. Rice response to different methods of potassium fertilization in salinity stress condition. *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*, 2012, 4 (12): 798-802
- [30] 李源, 刘贵波, 高洪文, 孙桂枝, 赵海明, 谢楠. 紫花苜蓿种质耐盐性综合评价及盐胁迫下的生理反应. 草业学报, 2010, 19 (4): 79-86
- [31] 史金红, 卢强, 张桂杰, 王世丛, 侯美玲, 刘丽英, 撒多文. 盐胁迫对紫花苜蓿生长发育及营养品质影响的研究进展. 草原与草业, 2024, 36 (1): 1-7
- [32] 李倩, 李晓霞, 程丽琴, 陈双燕, 齐冬梅, 杨伟光, 高利军, 新巴音, 刘公社. 羊草 *LcCBF6* 基因的表达特性和功能研究. 草业学报, 2021, 30 (10): 105-115
- [33] Zhou Y B, Liu C, Tang D Y, Yan L, Wang D, Yang Y Z, Gui J S, Zhao X Y, Li L G, Tang X D, Yu F, Li J L, Liu L L, Zhu Y H, Lin J Z, Liu X M. The receptor-like cytoplasmic kinase *STRK1* phosphorylates and activates CatC, thereby regulating  $\text{H}_2\text{O}_2$  homeostasis and improving salt tolerance in rice. *The Plant Cell*, 2018, 30 (5): 1100-1118
- [34] 林杉. 共表达 *ZcNHX1-VPI-1* 紫花苜蓿的分子鉴定及 *ZcNHX1-PcCLCg* 紫花苜蓿的耐盐性评价. 兰州: 兰州大学, 2021
- [35] 包爱科. 拟南芥液泡膜  $\text{H}^+$ -焦磷酸酶基因 *AVPI* 改良紫花苜蓿 (*Medicago Sativa* L.) 抗逆性的研究. 兰州: 兰州大学, 2009
- [36] 贾姝. 超表达 *BvNHX* 基因提高红豆草耐盐性的研究. 兰州: 兰州理工大学, 2017
- [37] Gou J Q, Debnath S, Sun L, Flanagan A, Tang Y H, Jiang Q Z, Wen J Q, Wang A Y. From model to crop: functional characterization of *SPL8* in *M. truncatula* led to genetic improvement of biomass yield and abiotic stress tolerance in alfalfa. *Plant Biotechnology Journal*, 2018, 16 (4): 951-962
- [38] 刘倩. 羊草转录因子 *LcbZIP46* 响应盐碱胁迫的功能及其调控机制研究. 北京: 中国农业科学院, 2024
- [39] Zhang D P, Zhang Z Y, Li C X, Xing Y M, Luo Y Q, Wang X S, Li D H, Ma Z Y, Cai H. Overexpression of *MsRCI2D* and *MsRCI2E* enhances salt tolerance in alfalfa (*Medicago sativa* L.) by stabilizing antioxidant activity and regulating ion homeostasis. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23 (17): 9810
- [40] 景海春, 张景昱, 金京波, 刘志鹏, 张保才, 付春祥, 程佑发, 林浩, 才宏伟, 梁承志, 周姚, 曹晓风, 种康. 饲草作物基础生物学与生物育种. 中国科学基金, 2023, 37 (4): 537-551
- [41] Barros J, Temple S, Dixon R A. Development and commercialization of reduced lignin alfalfa. *Current Opinion in Biotechnology*, 2019, 56: 48-54
- [42] 亓雯雯, 马红媛, 李亚晓, 杜艳, 孙梦丹, 武海涛. 优质牧草新品种选育方法研究进展. 草业学报, 2024, 33 (6): 187-202
- [43] 刘志鹏, 周强, 刘文献, 张吉宇, 谢文刚, 方龙发, 王彦荣, 南志标. 中国牧草育种中的若干科学问题. 草业学报, 2021, 30 (12): 184-193
- [44] 刘沂欣, 隋晓青, 王鑫尧, 郎梦卿, 孙凌子寅, 吉尔格. 外源褪黑素对盐胁迫下紫花苜蓿的缓解作用. 草业学报, 2025, 34 (9): 206-214
- [45] 王怡然. 咪唑丁酸钾对盐碱生境下紫花苜蓿生产性能的调控效应研究. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2025
- [46] 卜祥琪, 李姗姗, 段莹娜, 王迎春, 郑琳琳. 一氧化氮对盐碱胁迫下盐地碱蓬抗逆性及饲用品质的影响. 草业学报, 2024, 33 (9): 60-69
- [47] 吴世文, 南丽丽, 刘鑫, 傅俊士, 陈孝善, 张泽龙. 外源水杨酸对  $\text{NaCl}$  胁迫下红豆草光合特性和根系特征的影响. 草原与草坪, 2025, 45 (4): 188-195

(收稿日期: 2025-08-22)