

# 盐碱地紫花苜蓿的适应机制与栽培策略

赵力兴<sup>1</sup>, 王琳<sup>2</sup>, 温丽<sup>1</sup>, 侯伟峰<sup>1</sup>, 毕盛楠<sup>1</sup>, 其格其<sup>1</sup>, 孙乌日娜<sup>1</sup>

(1. 兴安盟农牧业科学研究所, 内蒙古 乌兰浩特 137400; 2. 甘肃农业大学草业学院, 草业生态系统教育部重点实验室, 甘肃省草业工程实验室, 中-美草地畜牧业可持续发展研究中心, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:**紫花苜蓿(*Medicago sativa*)是一种中强度耐盐碱豆科牧草,在盐碱地种植苜蓿具有较高的经济和生态效益。本文阐述了盐碱地苜蓿的适应机制及栽培策略:盐碱胁迫下紫花苜蓿通过增加渗透调节物质的积累、提高抗氧化酶活性,以保护膜系统,维持代谢平衡;苜蓿通过改变根、茎、叶的组织结构抑制毒害离子进入植物体和提高水分的运输代谢效率;制定适宜的灌排水制度改造盐碱土,以降低土壤含盐量;利用根际有益微生物改善根际微环境,以提高苜蓿的抗逆性;常规育种与基因工程育种技术相结合是培育耐盐碱新品种的重要途径。整合植物遗传育种学、植物生理生化和分子生物学等领域研究方法,是未来苜蓿耐盐碱研究工作的重点方向。

**关键词:**苜蓿;盐碱地;适应机制;栽培策略

**中图分类号:**S54 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2022)01-0142-08

**DOI:** 10.13817/j.cnki.cycp.2022.01.019



土壤—植被是陆地生态系统功能的基础,土壤质量和植被生长状况是陆地生态系统可持续发展的重要保证<sup>[1]</sup>。土壤中 NaCl 和 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 含量较高的土壤被称为盐土,Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 和 NaHCO<sub>3</sub> 含量较高的土壤称为碱土,而在自然界,盐土和碱土往往同时存在,称为盐碱土<sup>[2]</sup>。土壤盐化、碱化是两种不同的非生物胁迫,以高盐度和高 pH 值为主要特点<sup>[3]</sup>,对植物危害的程度大小为盐碱胁迫>碱胁迫>盐胁迫<sup>[4-5]</sup>。研究表明土壤中盐分的积累会破坏植物体内的离子平衡和正常的新陈代谢,引起可溶性盐离子在体内的积累,产生离子毒害,增加能耗和抑制植物对养分的获取能力,导致植物

代谢受阻以及抑制植物生长发育,使植物进一步萎蔫甚至死亡<sup>[6-7]</sup>。在碱胁迫下,随着植物根系土壤 pH 值的升高,无机阴离子减少,Fe<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup> 离子的沉积导致植物矿质营养吸收受阻<sup>[8-9]</sup>。土地盐碱化是非常重要的非生物胁迫,严重影响作物的生产和农业生产<sup>[10]</sup>。土壤盐碱化已经成为一个世界性的资源问题和生态问题,逐渐威胁人类的生存需求。

紫花苜蓿(*Medicago sativa*)是一种重要的多年生优质豆科牧草,有着“牧草之王”的美誉<sup>[11]</sup>。紫花苜蓿具有中强度的抗盐碱特性,叶片具有排盐能力<sup>[12]</sup>,能够在含盐量 0.1%~0.8% 的盐碱地中生长<sup>[13-14]</sup>,50~200 mmol/L 的 NaCl 胁迫会降低产量<sup>[15]</sup>。种子萌发期是植物盐害最敏感时期,盐胁迫会显著降低紫花苜蓿相对发芽率、相对发芽势、发芽指数、胚根干质量和胚芽干质量,半致死盐浓度为 0.85%,1.2% NaCl 为耐盐性鉴定的适宜浓度<sup>[16]</sup>。当苏打(Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)浓度超过 30 mmol/L 时,会对种子的萌发和芽苗的生长产生明显的抑制作用<sup>[17]</sup>。在盐碱地建植苜蓿草地:一方面提高了盐碱地的利用率,缓解了与粮食作物争地的矛盾,同时能够为草地畜牧业的发展提供优质饲草;另一方面能够改良盐碱地,提高土壤肥力。青海省西北部弃耕盐碱地 pH 值在 8 左右,含盐量高达

**收稿日期:**2021-01-25; **修回日期:**2021-03-04

**基金项目:**内蒙古农牧业青年创新基金(2020Q NJJM03);兴安盟科技计划项目“耐寒优质苜蓿选育及配套栽培技术研究”;内蒙古农牧业青年创新基金(2021Q NJJM04)项目

**作者简介:**赵力兴(1994-),男,内蒙古兴安盟人,实习研究员,主要从事牧草栽培与育种的研究。

E-mail:1327344218@qq.com

温丽为通讯作者。

E-mail:wenli0410110@163.com

6.73~28.08 g/kg,且表层土壤盐分聚集,养分含量极低<sup>[18]</sup>。种植紫花苜蓿后提高了土壤中全氮和有效钾含量,提高土壤肥力<sup>[19]</sup>。随着苜蓿种植时间的增加,生物产量减少,对土壤养分的消耗降低,根系一根瘤菌共生体更加成熟,固氮能力增强,大量的植物残体分解形成腐殖质,使土壤质量提高<sup>[20]</sup>。

在盐碱地建植苜蓿人工草地,对开发利用盐碱地资源,提高盐碱地的经济生态效益有着重要意义。本文论述了盐碱地苜蓿的适应机制和栽培策略,旨在为盐碱地苜蓿栽培管理提供一定参考。

## 1 盐碱地苜蓿的适应机制

苜蓿在盐碱地上生长,随着盐碱胁迫时间的延长要抵御由水、渗透胁迫造成的短期胁迫和由离子毒害作用造成的长期胁迫<sup>[21]</sup>。紫花苜蓿如何抵御、缓解和适应渗透胁迫及离子毒害,维持体内渗透和酸碱平衡成为研究的热点。

### 1.1 苜蓿的渗透调节物质与耐盐碱性

在逆境胁迫下植物体内脯氨酸和可溶性糖含量增加,这是植物对逆境胁迫的一种生理生化反应<sup>[22-23]</sup>。植物体内的游离脯氨酸作为一种重要的渗透调节物质,当苜蓿受到盐碱胁迫时,体内会合成大量的游离脯氨酸来调节植物体的渗透势、平衡细胞代谢作用维持细胞内环境的相对稳定<sup>[24-25]</sup>。碱胁迫对苜蓿的影响大于盐胁迫,主要是由于在碱胁迫下苜蓿通过脯氨酸进行渗透调节,同时进行植物体内 pH 值调节,而后者需要消耗大量能量,导致苜蓿植株矮小、存活率降低。可溶性糖在苜蓿抵御胁迫的过程中也起到重要作用,盐碱胁迫下苜蓿体内可溶性糖含量增加,能够为脯氨酸的合成提供碳骨架和能量。苜蓿在盐碱胁迫下会发生膜质过氧化,丙二醛是膜质过氧化的产物,能够与膜中蛋白结合引起蛋白质分子内和分子间交联,使蛋白质分子发生聚合<sup>[26]</sup>,会使叶绿素降解<sup>[27]</sup>,降低光合作用,进而抑制植物生长,其含量多少反映了膜的稳定性和受伤害程度<sup>[28-29]</sup>。在低浓度盐碱胁迫下,苜蓿通过一系列的调节机制使膜不受损伤,当中性盐浓度 $\geq 100$  mmol/L 或碱性盐浓度 $\geq 60$  mmol/L 时,苜蓿体内丙二醛含量显著增加,即苜蓿受伤害程度增加<sup>[30]</sup>。

### 1.2 苜蓿耐盐碱性与抗氧化酶活性

过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)是植物体内主要的抗氧化酶。在盐碱

逆境胁迫中,植物体内 SOD 可将超氧离子歧化为过氧化氢,CAT 和 POD 将过氧化氢氧化还原为氧气和水,从而清除植物体内的活性氧,消除因盐碱胁迫产生的毒害物质,从而保护植物膜系统,保证苜蓿在一定盐碱胁迫下能够正常生长发育<sup>[31-32]</sup>。研究表明,在混合盐碱胁迫下 POD、CAT 和 SOD 可在一定程度下清除苜蓿体内过剩的活性氧,维持代谢平衡,保护膜系统。当胁迫超过苜蓿承受极限时 POD、CAT 和 SOD 活性会降低或被破坏,使植物生长受阻<sup>[33]</sup>。李波等<sup>[34]</sup>研究表明苜蓿体内 SOD 和 POD 的活性随着苏打盐碱浓度的增加而增加,当浓度超过 150 mmol/L 时逐渐失去活性、降低对盐碱胁迫的抵御能力。

### 1.3 苜蓿叶、茎、根解剖结构与耐盐碱性

盐碱胁迫会对苜蓿生长发育产生负效应,苜蓿通过不同的结构来适应盐碱环境。叶片是植物进行光合作用和蒸腾作用的重要器官,其结构特征能够体现植物与生境的适应特点<sup>[35]</sup>。盐碱胁迫使苜蓿叶片整体变薄,苜蓿叶片表皮细胞壁角质层增厚;海绵组织薄壁细胞体积增大,以增加水分容量稀释细胞内盐浓度<sup>[36-37]</sup>;主叶脉维管束中木质导管数量减少,孔径变小,以降低从茎秆向叶片水分输送量<sup>[37]</sup>。苜蓿茎秆通过改变皮层、维管组织和髓的结构来适应环境的变化:苜蓿茎秆表皮细胞由圆形大小不一向方形大小均一转变;茎秆皮层细胞排列紧密;维管束木质导管数量和孔径降低;髓腔面积减少;髓细胞逐渐规则且髓细胞壁加厚,以阻止体内水分散失,提高苜蓿缺水条件下的抗倒伏能力<sup>[37-38]</sup>。植物根系具有固定植株、吸收和运输水分养分、合成贮藏营养物质等功能,是植物最先感受土壤盐碱胁迫等逆境胁迫的部位。当受到逆境胁迫后通过生理或形态变化来响应逆境胁迫<sup>[39]</sup>。植物根系具有阻止盐分进入输导组织的作用。在盐碱胁迫下苜蓿根系直径显著增加,木质导管直径降低但数量增加,加强了对离子运输的选择和控制以及水分的运输,促进植物的生理代谢。同时盐碱胁迫水平的提升会使周皮细胞的排列更加紧密,根部所有组织内细胞壁加厚,这种特殊的结构抑制了有毒有害离子进入苜蓿根系<sup>[37]</sup>。苜蓿根系发达生物量高,具有较强的向土壤深处生长的能力,三年平均根长为 240.80~460.77 cm<sup>[40]</sup>。丰富的根系能够分泌大量的有机物质(糖类、有机酸、氨基酸等)和胞外酶(蔗糖酶、脲酶、磷脂酶等),改善土壤根际微环境<sup>[41]</sup>。研究表明混合盐碱胁迫对根尖的影响

响表现为负效应,低浓度的混合盐碱胁迫对苜蓿根系生长具有一定的促进作用,高浓度混合盐碱胁迫且碱性盐比例的增加,对苜蓿根系生长的抑制作用更加明显,当盐浓度达到 150 mmol/L 时,根系总长度显著降低<sup>[42]</sup>。

## 2 盐碱地苜蓿栽培策略

苜蓿在盐碱胁迫下,其适应能力存在阈值,适宜的栽培策略有益于盐碱地苜蓿的生长。通过合理的灌溉制度以改造盐碱土、接种有益根际微生物以改善根际微环境、选育耐盐碱品种以提高抗性,提高苜蓿对盐碱环境的抵御和适应能力。

### 2.1 灌排水洗盐与土壤含盐量

盐碱地苜蓿栽培策略中灌水洗盐是最直接、见效快的方法,能够快速降低土壤含盐量,有效缓解盐碱对植物的毒害作用,制定科学的灌排水洗盐制度尤为关键。灌水:植物蒸腾会带动盐分上移,如果灌溉水量仅满足植物蒸腾、蒸发的需水要求,没有足够的水将土壤中的盐分淋洗到深层,则会在植物根部下层形成盐分聚集层,影响植物的生长并且灌溉用水应当选择矿化度较低的水源。排水:及时抽排地下水,能够防止地下水位上升、浅水蒸发加剧和盐分积累造成的次生盐碱化。研究表明<sup>[43]</sup>,在地下水盐分浓度较低,表土没有严重积盐的地区,可适当加大灌溉水量。在重度、中度盐碱化土地且地下水矿化度高的情况下,为尽快消除根系范围内的积盐,应该加大渠管量使表层积盐得到淋洗,并且适量抽排地下水。

暗管排水是发展较成熟的、应用较广的水利工程措施,它遵循“盐随水来,盐随水去”的水盐运移规律,将带有孔隙的管道埋于地下一定深度从而达到控制地下水位及辅助灌溉水淋洗盐分的目的<sup>[44]</sup>。暗管控制性排水可加强盐分的淋洗,降低表层土壤的含盐量,脱盐依次为  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 。特别是在旱季,暗管排盐具有显著的效果<sup>[49]</sup>。暗管洗盐不仅可以有效降低土壤中的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  等离子,还可以控制地下水位<sup>[50-51]</sup>。随着使用时间的延长会造成暗管管道淤积、盐碱重返表土的情况,降低洗盐效果。毛细透排水带淋盐技术则要比传统暗管排水系统具有更高的排水效率且不会造成管道堵塞<sup>[52-54]</sup>。张震中等<sup>[55]</sup>采用毛细透排水带技术在青海盐碱地改良的研究结果表明。毛细透排水带对  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$

离子的淋洗作用显著,对青海高寒区中度、重度盐渍化地区土壤脱盐率达 94.41%、98.61%。有效地降低土壤盐碱化程度、改善土壤性质、提高土地生产力。滴灌技术作为农业生产中一项重要的节水技术,具有节水保墒、促进植物光合作用和增加植物生物量的作用<sup>[56-58]</sup>。研究表明滴灌对盐碱地苜蓿土壤盐分具有很好的淋洗作用,在滴灌 24 h 和 72 h 后滴灌土壤水分浸润区电导率和 pH 值分别降低 72.2% 和 8.29%、74.7% 和 5.0%,滴灌结束后剧烈的水分蒸发导致水去盐留,形成土壤返盐现象,发生次生盐渍化,因此要制定适宜地滴灌频率和灌水定额,充分发挥滴灌的淋洗作用<sup>[59]</sup>。在盐碱地苜蓿栽培措施中,滴灌技术不仅可提高苜蓿产草量还有利于水肥一体化技术的推广,有利于各层次土壤中主要盐分离子的稳定<sup>[60]</sup>。

因地制宜的制定灌排水方案,使地面水和地下水联合调度运行、水资源达到合理利用、优化配置,从而改造盐碱土。

### 2.2 苜蓿耐盐碱性与根际微环境

生物修复技术是利用植物与微生物的相互作用,提高植物的抗逆性,改善土壤微环境促进植物生长<sup>[61]</sup>。植物根际促生菌(Plant Growth Promoting Rhizobacteria, PGPR)是指能够定殖在植物根际且有利于植物生长,提高作物产量品质的有益菌<sup>[62]</sup>。植物根际促生菌可以通过产生植物激素(脱落酸、赤霉素、细胞分裂素和植物生长素);产生 1-氨基环丙烷-1-羧酸(ACC)脱氢酶,降低生长中植物根部的乙烯水平;固氮、溶磷、解钾、产生嗜铁素和诱导植物对生物及非生物胁迫的系统抗性来促进植物生长<sup>[63-64]</sup>。刘佳莉<sup>[65]</sup>在盐碱地中生长的植物根际筛选出 4 株含 ACC 脱氢酶的 PGPR。这 4 株菌株(*Serratia marcescens*、*Acinetobacter baumannii*、*Pseudomonas mediterranea*、*Pseudomonas fluorescens*)通过降低盐碱胁迫下乙烯的合成量来促进紫花苜蓿的生物量的积累、提高蛋白含量及磷素利用率降低纤维含量。盐碱胁迫下接种 PGPR 后紫花苜蓿根系活力、叶绿素含量和抗氧化酶活性显著提高,同时清除过量的超氧离子自由基等有害物质,积累渗透保护物质,提高耐盐碱能力。向君亮<sup>[66]</sup>从草原盐碱土壤中分离得到一株能够产生植物激素 IAA 和 ACC 脱氢酶功能的菌株掘越氏芽孢杆菌(*Bacillus horikoshii*)。苜蓿接种后发芽率和发芽势分别提高了 15% 和 10%,缓解了盐碱胁迫对苜蓿种子

萌发的抑制作用。丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)能够与植物的根系共生形成菌根,显著改善植物养分和水分的吸收,影响植物的生理代谢过程,增强植物的抗逆性<sup>[67]</sup>。在单盐胁迫条件下接种 AMF 能够调节紫花苜蓿的生理生长来增加植物的耐盐性<sup>[68]</sup>。酚酸类物质是植物生长过程中所产生的一类重要次生代谢产物,其可以通过增加植物细胞壁厚度<sup>[69]</sup>,以及调控抗氧化酶活性来增加植物的抗逆能力<sup>[70-72]</sup>。有研究表明接种 AMF 能够促进宿主植物体内酚酸含量的积累<sup>[73]</sup>。赵琦等<sup>[74]</sup>认为在混合盐碱胁迫下,接种 AMF 能够改变紫花苜蓿体内酚酸的含量、积累渗透调节物质,提高耐盐碱性,促进植物生长。这些研究结果为研制复合菌肥,治理和利用盐碱地奠定了理论基础。

### 2.3 苜蓿耐盐碱性与新品种选育

苜蓿中等的耐盐碱能力,限制了紫花苜蓿的种植范围,因此选育耐盐碱能力更强的紫花苜蓿品种成为亟待解决的问题。常规育种目前仍然是选育抗盐碱苜蓿新品种的主要方法。国外通过杂交手段培育出 AZ-Germ SaltII、AZ-97MEC、AZ-97MEC-ST、ZS-9491、ZS9592 等耐盐碱紫花苜蓿品种<sup>[75]</sup>。中国农业科学院畜牧兽医研究所保定紫花苜蓿(*M. sativa* cv. Baoding)、秘鲁苜蓿(*M. sativa* cv. Peru)、南皮苜蓿(*M. sativa* cv. Nanpi)、RS 苜蓿(*M. sativa* cv. RS)及细胞耐盐筛选的植株为原材料,经开放授粉和田间混合选择 4 代培育出耐盐碱新品种“中苜 1 号”,其产量在盐碱含量为 0.3% 的盐碱地上比一般栽培品种增加 10%<sup>[76]</sup>。以“中苜 1 号”为亲本材料,通过盐碱地表现型选择、耐盐性一般配合力的测定,经过两次轮回选择和一次混合选择,获得耐盐苜蓿新品系“中苜 3 号”。新品种在盐碱地表现出较好的丰产性与适应性,在含盐量为 0.18%~0.39% 的盐碱地上,比对照品种“中苜 1 号”产量提高 10% 以上,干草粗蛋白含量达 18%~20%<sup>[77]</sup>。<sup>60</sup>Co- $\gamma$  辐射诱变育种是一种创造新品种和新种质的重要手段<sup>[78]</sup>。 $\gamma$  射线照射可降低 Na<sup>+</sup> 在紫花苜蓿中的积累<sup>[79]</sup>,在臭氧协同胁迫时,盐碱地紫花苜蓿相对产量增加 42%<sup>[80]</sup>。黑龙江省畜牧研究所对亲本二倍体扁蓿豆与四倍体紫花苜蓿进行辐射诱变处理,攻克了远缘杂交关,采用集团选择法选育,历经 16 年育成了“龙牧 801”和“龙牧 803”紫花苜蓿新品种。通过品种比较试验、区域试验和生产试验结果表明该

品种具有耐盐抗寒高产的特点<sup>[81]</sup>。

由于选育周期长、费时费力限制了传统杂交育种的发展。随着分子生物学的发展,转基因技术成为育种工作的重要手段。Deak 等<sup>[82]</sup>首次报道了利用转基因技术获得抗性苜蓿植株。Webb 等<sup>[83]</sup>利用农杆菌介导法培育出转基因紫花苜蓿。此后紫花苜蓿转基因技术取得了很大进展,当前利用转基因技术将优良性状导入紫花苜蓿以提高苜蓿耐盐碱性已经成为一种重要途径<sup>[84]</sup>。陈冉冉等<sup>[85]</sup>利用农杆菌介导的子叶节侵染法将从野生大豆中筛选出碱胁迫应答基因 *GsARHP* 转化肇东苜蓿,转基因株系在碱胁迫下长势良好,质膜透性和丙二醛含量低于非转基因株系,叶绿素含量和 CAT 活性高于非转基因株系,提高了苜蓿的耐碱性。植物谷胱甘肽 S-转移酶(*GsT*)能够催化谷胱甘肽(*GSH*、 $\gamma$ -*Glu-Cys-Gly*)与生物异源物或细胞过氧化物结合,以促进这些底物代谢、区域化隔离或将其彻底清除。王臻昱等<sup>[86]</sup>从野生大豆中筛选克隆得到 *GsGSTI9* 基因,转化苜蓿后进行盐碱胁迫。转基因株系 *GsT* 酶活性是非转基因的 1.19~1.52 倍,且长势良好,质膜透性和丙二醛含量显著低于非转基因株系,叶绿素含量和根系活力显著高于非转基因株系。Suarez 等<sup>[87]</sup>将酵母海藻糖-6-磷酸合成酶(trehalose-6-phosphate synthase)基因 *TPS1* 和海藻糖-6-磷酸磷酸酶(trehalose-6-phosphate phosphatase, *TPP*)基因 *TPS2* 融合,分别以 35S 和 rd29A 启动子驱动在紫花苜蓿中表达,转基因株系耐盐碱性显著提高。Winicov 等<sup>[88-89]</sup>将转录因子 *Alfin1* 导入紫花苜蓿中,超表达的 *Aflin1* 的愈伤组织可抵御 171mmol/L 的 NaCl 胁迫,增强 *MsPRP2* 的表达和苜蓿耐盐性。

植物的耐盐碱性是受多个基因协同控制的数量性状,目前报道的只涉及单基因的转化,且缺乏品种的区域性试验。山东省林业科学研究院科研团队利用农杆菌介导技术将山菠菜(*Atriplex hortensis*)甜菜碱醛脱氢酶 Ah-BADH 的编码基因导入中苜 1 号紫花苜蓿, T1 代植株可抵御含量为 0.8%~0.9% 的 NaCl 胁迫,经过对 T3 代转基因植株的鉴定和筛选,通过自交、杂交所选育出耐盐碱的“山苜 2 号”,品种比较试验、区域试验和生产试验表明山苜 2 号在不同盐碱条件下植株抗逆性和产草量明显高于中苜 1 号<sup>[90-91]</sup>。BADH 在山苜 2 号中稳定地遗传和表达,使生物技术手段结合自交和杂交等常规育种方法培育耐盐新品种成为一条有

效且简捷的途径。

### 3 总结与展望

苜蓿通过调节生理代谢改变组织结构等自身特点以适应盐碱环境,其耐盐碱性存在阈值,通过选育耐盐碱品种,优化农艺措施,以保障紫花苜蓿的生长发育。紫花苜蓿的抗盐碱性是由其体内抗盐碱基因的表达、耐盐碱代谢途径及其与其他多种代谢途径综合作用的复杂过程。目前对紫花苜蓿的耐盐碱机制仍不完全清楚,是限制获得耐盐碱性强的新品种的主要障碍。在今后苜蓿耐盐碱研究工作中,需要整合植物遗传育种学、植物生理生化和分子生物学等领域研究方法,对进一步明确苜蓿的耐盐碱机制,最大限度地挖掘苜蓿的生物学潜力,培育更多抗盐碱性强、高产优质苜蓿品种和制定相关栽培措施具有重要作用。

#### 参考文献:

[1] 贡璐,张海峰,吕光辉,等.塔里木河上游典型绿洲不同连作年限棉田土壤质量评价[J].生态学报,2011,31(14):4136-4143.

[2] 郑炳松.高级植物生理学[M].杭州:浙江大学出版社,2011:9.

[3] Yang J Y, Zheng W, Tian Y, *et al.* Effects of various mixed salt-alkaline stresses on growth, photosynthesis, and photosynthetic pigment concentrations of *Medicago ruthenica* seedlings[J]. *Photosynthetica*, 2011, 49(2): 275-284.

[4] Wang X, Jiang P, Ma Y, *et al.* Physiological Strategies of Sunflower Exposed to Salt or Alkali Stresses; Restriction of Ion Transport in the Cotyledon Node Zone and Solute Accumulation[J]. *Agronomy Journal*, 2015, 107(6): 2181-2192.

[5] Gong B, Wang X F, Wei M, *et al.* Overexpression of S-adenosylmethionine synthetase1 enhances tomato callus tolerance to alkali stress through polyamine and hydrogen peroxide cross-linked networks[J]. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 2016, 124(2): 377-391.

[6] Hasegawa P M, Bressan R A, Zhu J K, *et al.* Plant cellular and molecular responses to high salinity[J]. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Bio*, 2000, 51(51): 463-499.

[7] 杨晓英,杨劲松,刘广明,等.盐碱地稻田旱作后土壤肥力变化及其对作物生长的影响[J].土壤通报,2006(4):675-679.

[8] 郭瑞,李峰,周际,等.亚麻响应盐、碱胁迫的生理特征

[J]. *植物生态学报*, 2016, 40(1): 69-79.

[9] Capula-Rodriguez R, Valdez-Aguilar L A, Cartmill D L, *et al.* Supplementary calcium and potassium improve the response of tomato (*Solanum lycopersicum* L.) to simultaneous alkalinity, salinity, and boron stress[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2016, 47(4): 505-511.

[10] 张衷华,王化,唐中华,等.松嫩草地不同降水区土壤盐碱化程度与羊草生产力关系的比较研究[J].草地学报,2016,24(3):590-597.

[11] 曹宏,章会玲,盖琼辉,等.22个紫花苜蓿品种的引种试验和生产性能综合评价[J].草业学报,2011,20(6):219-229.

[12] 张玉霞,崔禄,郭园,等.23个紫花苜蓿品种种子萌发期耐盐碱性的综合评价[J].种子,2015,34(10):71-74.

[13] 中国科学院中国植物志编辑委员会.中国植物志[M].北京:科学出版社,1998:266,148.

[14] 刘彦,丁荣荣,汪峰,等.19个苜蓿品种的耐盐碱试验研究[J].草业科学,2010,27(5):62-66.

[15] Bekki A, Trinchant J C, Rigaud J. Nitrogen fixation (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> reduction) by *Medicago* nodules and bacteroids under sodium chloride stress[J]. *Physiologia Plantarum*, 1987, 71: 61-67.

[16] 李明雨,王焱,梁丹妮,等.22份苜蓿种质萌发期耐盐性综合评价[J].浙江农业学报,2019,31(5):746-755

[17] 李波,方志坚,张英俊,等.龙牧苜蓿种质资源耐混合苏打盐碱能力综合分析[J].草地学报,2019,27(1):141-147.

[18] 王启基,王文颖,王发刚,等.柴达木盆地弃耕地成因及其土壤盐渍地球化学特征[J].土壤学报,2004(1):44-49.

[19] 王彦龙,俞畅,张春平,等.种植紫花苜蓿对柴达木盆地高寒荒漠区弃耕地盐碱土壤的改良作用[J].青海畜牧兽医杂志,2020,50(5):22-26.

[20] 郑敏娜,梁秀芝,李荫藩,等.晋北盐碱区不同种植年限人工紫花苜蓿草地土壤质量的评价[J].草地学报,2017,25(4):888-892.

[21] Wang L X, Fang C, Wang K. Physiological responses of *Leymus chinensis* to long-term salt, alkali and mixed salt-alkali stresses[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2015, 38(4): 526-540.

[22] 汤章城.逆境条件下植物脯氨酸的累积及其可能的意义[J].植物生理学通讯,1984(1):15-21.

[23] Greenway H, Munne R. Mechanisms of salt tolerance in Nonhalophytes[J]. *Annual Review of Plant Physiology*,

- 1980,(31):149-190.
- [24] Zhao F G, Sun C, Liu Y L. Ornithine pathway in proline biosynthesis activated by salt stress in barley seedlings [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2001, 43(1): 36-40.
- [25] Deutch C E. Post-transcriptional regulation of a salt-inducible alfalfa gene encoding a putative chimeric proline-rich cell wall protein[J]. *Plant Molecular Biology*, 1995, 27: 411-415
- [26] Huff A. Peroxides-catalysed oxidation of chlorophyll by hydrogenperoxide[J]. *Phytochemistry*, 1982, 21: 261-265.
- [27] Uphem B L. Photooxidative reactions in chloroplast thylakoids; Evidence for a Fentotype reaction P romoted by superoxide or ascorbate [J]. *Photosynthesis Research*, 1986, 8: 235-247.
- [28] 袁琳, 克热木·伊力, 张利权. NaCl 胁迫对阿月浑子实生苗活性氧代谢与细胞膜稳定性的影响[J]. *植物生态学报*, 2005(6): 119-125.
- [29] Jaleel C A, Gopi R, Sankar B, *et al.* Studies on germination, seedling vigour, lipid peroxidation and prolinem etabolism in *Catharanthus roseus* seedlings under salt-stress[J]. *South African Journal of Botany*, 2007, 73(2): 190-195.
- [30] 王保平, 董晓燕, 董宽虎. 盐碱胁迫对紫花苜蓿幼苗生理特性的影响[J]. *草地学报*, 2013, 21(6): 1124-1129.
- [31] Fridovich I. *Free Radical in Biology*[M]. New York: New York Academic Press, 1976: 239.
- [32] Scott M D, Meshnick S R, Eaton J W. Superoxide dismutase-rich bacteria. Paradoxical increase in oxidant toxicity[J]. *The Journal of Biological Chemistry*, 1987, 262(8): 3640-3645.
- [33] 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.
- [34] 李波, 林浩. 紫花苜蓿对苏打盐碱胁迫的生理响应[J]. *黑龙江畜牧兽医*, 2018(1): 168-170.
- [35] Castro-Diez P, Puyravaud J P, Cornelissen J H C. Leaf structure and anatomy as related to leaf mass per area variation in Seedlings of a wide range of woody plant species and types [J]. *Oecologia*, 2000, 124(4): 476-486.
- [36] 龚明, 丁念诚, 贺子义, 等. 盐胁迫下大麦和小麦叶片脂质过氧化伤害与超微结构变化的关系[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 1989(11): 841-846+903.
- [37] 田晨霞, 张咏梅, 王凯, 等. 紫花苜蓿组织解剖结构对 NaHCO<sub>3</sub> 盐碱胁迫的响应[J]. *草业学报*, 2014, 23(5): 133-142.
- [38] 李瑞梅, 周广奇, 符少萍, 等. 盐胁迫下海马齿叶片结构变化[J]. *西北植物学报*, 2010, 30(2): 287-292.
- [39] 童辉, 孙锦, 郭世荣, 等. 等渗 Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 和 NaCl 胁迫对黄瓜幼苗根系形态及活力的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2012, 35(3): 37-41.
- [40] 郑敏娜, 韩志顺, 梁秀芝, 等. 不同生长年限紫花苜蓿根系形态特征分析[J]. *中国草地学报*, 2019, 41(6): 60-66.
- [41] 洪绂曾. *苜蓿科学*[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009.
- [42] 张晓磊, 刘晓静, 齐敏兴, 等. 混合盐碱对紫花苜蓿苗期根系特征的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(3): 340-346.
- [43] 尹大凯, 胡和平, 惠士博. 青铜峡银北灌区井灌井排水盐运动数值模拟[J]. *农业工程学报*, 2002(3): 1-4.
- [44] 于淑会, 刘金铜, 李志祥, 等. 暗管排水排盐改良盐碱地机理与农田生态系统响应研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(12): 1664-1672.
- [45] 彭成山, 杨玉珍, 等. 黄河三角洲暗管改碱工程技术实验与研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006.
- [46] Singh R, Helmers M J, Qi Z M. Calibration and validation of DRAINMOD to design subsurface drainage systems for Iowa's tile landscapes[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 85(3): 221-232.
- [47] Wiskow E, Vander P R R. Calculation of drain spacings for optimal rainstorm flood control[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 272(1/4): 163-174.
- [48] 张亚年, 李静. 暗管排水条件下土壤水盐运移特征试验研究[J]. *人民长江*, 2011, 42(22): 70-72.
- [49] 徐友信, 于淑会, 石磊. 高水位盐碱地暗管控制性排水的降盐抑碱作用研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(3): 164-169.
- [50] 于淑会, 刘金铜, 刘慧涛, 等. 暗管控制排水技术在近滨海盐碱地治理中的应用研究[J]. *灌溉排水学报*, 2014, 33(3): 42-46.
- [51] 陈阳, 张展羽, 冯根祥, 等. 滨海盐碱地暗管排水除盐效果试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2014, 33(3): 38-41.
- [52] 孟凤轩, 迪力夏提, 罗新湖, 等. 新垦盐渍化农田暗管排水技术研究[J]. *灌溉排水学报*, 2011, 30(1): 106-109.
- [53] 石佳, 田军仓, 朱磊. 暗管排水对油葵地土壤脱盐及水分生产效率的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(11): 46-50.
- [54] 于淑会, 刘金铜, 李志祥, 等. 暗管排水排盐改良盐碱地机理与农田生态系统响应研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(12): 1664-1672.

- [55] 张震中,张金旭,黄佳盛,等.不同排水措施对青海高寒区盐碱地改良效果的研究[J].灌溉排水学报,2018,37(12):78-85.
- [56] Dogan E, Kirnak H, Dogan Z. Effect of varying the distance of collectors below a sprinkler head and travel speed on measurements of mean water depth and Uniformity for a linear move irrigation sprinkler system[J]. Biosystems engineering, 2008, 99(2): 190-195.
- [57] Wan S Q, Kang Y H, Wang D, *et al.* Effect of drip irrigation with saline water on tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill) yield and water use in semi-humid area[J]. Agricultural water management, 2007, 90(1/2): 63-74.
- [58] Jose C, Laura J, Miriam P, *et al.* Maize growth and yield under daytime and nighttime solid-set sprinkler irrigation [J]. Agronomy journal, 2008, 100(6): 1573-1579.
- [59] 卢垟杰,刘庆,聂坤堃,等.平作紫花苜蓿滴灌前后盐碱地土壤水盐运移研究[J].节水灌溉,2019(1):68-71.
- [60] 张昌爱,辛淑荣,王国良,等.不同灌水方式对盐碱地苜蓿生长及土壤水盐动态的影响[J].排灌机械工程学报,2017,35(3):271-276.
- [61] Zhuang X, Chen J, Shim H, *et al.* New advances in plant growth promoting growth-promoting rhizobacteria for bioremediation [J]. Environment international, 2007, 33(3): 406-413.
- [62] Islam F, Yasmeen T, Arif M S, *et al.* Plant growth promoting bacteria confer salt tolerance in *Vigna radiata* by up-regulation antioxidant defense and biological soil fertility[J]. Plant Growth Regulation, 2016, 80(1): 1-14.
- [63] Hayat R, Ali S, Amara U, *et al.* soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion; a review[J]. Annals of Microbiology, 2010, 60(4): 579-598.
- [64] Parry J A, Jan S, Kamili A N, *et al.* current perspectives on plant growth-promoting rhizobacteria [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2016, 35(3): 877-902.
- [65] 刘佳莉.植物根际促生细菌的筛选及其缓解紫花苜蓿盐碱胁迫的作用研究[D].哈尔滨:哈尔滨师范大学,2017.
- [66] 向君亮,唐呈瑞,王佳琦,等.盐碱胁迫下一株促进苜蓿生长的细菌筛选与鉴定[J].干旱地区农业研究,2019,37(2):266-272.
- [67] 徐丽娟,刁志凯,李岩,等.菌根真菌的生理生态功能[J].应用生态学报,2012,23(1):285-292.
- [68] 陆爽,郭欢,王绍明,等.盐胁迫下 AM 真菌对紫花苜蓿生长及生理特征的影响[J].水土保持学报,2011,25(2): 227-231.
- [69] Harrison M J. Molecular and cellular aspects of the arbuscular mycorrhizal symbiosis [J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1999, 50: 361-389.
- [70] Wang H, Zhang Z, Guo Y, *et al.* Hawthorn fruit increases the antioxidant capacity and reduces lipid peroxidation in senescence accelerated mice [J]. European Food Research and Technology, 2011, 232(5): 743-751.
- [71] Lambais M R, Rios-rui W F, Andrade R M. Antioxidant responses in bean (*Phaseolus vulgaris*) roots colonized by arbuscular mycorrhizal fungi [J]. New Phytologist, 2003, 160(2): 421-428.
- [72] Jeon S M, Bok S H, Jang M K, *et al.* Antioxidative activity of naringin and lovastatin in high cholesterol-fed rabbits [J]. Life Science, 2001, 69(24): 2855-2866.
- [73] Araim G, Saleem A, John T, *et al.* Root colonization by an arbuscular mycorrhizal (AM) fungus increases growth and secondary metabolism of purple coneflower, *Echinacea purpurea* (L.) Moench [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(6): 2255-2258.
- [74] 赵琦,包玉英.混合盐碱胁迫下丛枝菌根真菌对紫花苜蓿生长及 2 种酚酸含量的影响[J].西北植物学报,2015,35(9):1829-1836.
- [75] 张立全,张凤英,哈斯阿古拉.紫花苜蓿耐盐性研究进展[J].草业学报,2012,21(6):296-305.
- [76] 杨青川,耿华珠,孙彦.耐盐苜蓿新品种中苜一号[J].作物品种资源,1999(2):27.
- [77] 杨青川.耐盐苜蓿“中苜 3 号”新品种的选育与应用[M].呼和浩特:内蒙古自治区农牧业科学院,2019.
- [78] 李波,李祥莉.<sup>60</sup>Co-γ 辐射诱变处理对无芒雀麦种子萌发及幼苗期抗旱性的影响[J].干旱地区农业研究,2018,36(2):118-123.
- [79] Rejili M, Telahigue D, Lachiheb B, *et al.* Impact of gamma radiation and salinity on growth and K/Na balance in two populations of *Medicago sativa* (L.) cultivar Gabès [J]. Progress in Natural Science, 2008, 18(9): 1095-1105.
- [80] Maggio A, Fabrizio Quaglietta Chiarandà, Cefariello R, *et al.* Responses to ozone pollution of alfalfa exposed to increasing salinity levels [J]. Environmental Pollution, 2009, 157(5): 1445-1452.
- [81] 李红,罗新义,王殿魁."龙牧 801 号"与"龙牧 803 号"苜蓿新品种选育报告[J].黑龙江畜牧科技,1996(1):3-7.
- [82] Deak M, Kiss G B, Korkz C, *et al.* Transformation of *Medicago* by agrobacterium mediated gene transfer [J]. Plant Cell Reports, 1986, 5: 97-100.

- [83] Webb B L. Response of seedling alfalfa(*Medicago sativa*) to four postemergence herbicides[J]. *Weed Technology*, 1991, 5(4): 736—738.
- [84] 赵阳, 朱延明, 柏锡, 等. 转 *GsCBRLK/SCMRP* 双价基因苜蓿耐碱性及氨基酸含量分析[J]. *作物学报*, 2014, 40(3): 431—438.
- [85] 陈冉冉, 朱娉慧, 贾博为, 等. 碱胁迫应答基因 *GsARHP* 的克隆及转基因紫花苜蓿的耐碱性分析[J]. *草业学报*, 2017, 26(9): 92—103.
- [86] 王臻昱, 才华, 柏锡, 等. 野生大豆 *GsGST19* 基因的克隆及其转基因苜蓿的耐盐碱性分析[J]. *作物学报*, 2012, 38(6): 971—979.
- [87] Suarez R, Calderan C, Iturriaga G. Enhanced tolerance to multiple abiotic stresses in transgenic alfalfa accumulating trehalose[J]. *Crop Sciences*, 2009, 49(5): 1791—1799.
- [88] Winicov I, Bastola D R. Transgenic over expression of the transcription factor *Alfin1* enhances expression of the endogenous *MsPRP2* gene in Alfalfa and improves salinity tolerance of the plants[J]. *Plant Physiology*, 1999, 120: 473—480.
- [89] Winicov I. *Alfin1* transcription factor over expression enhances plant root growth under normal and saline conditions and improves salt tolerance in alfalfa[J]. *Plantab Berlin*, 2000, 210(3): 416—422.
- [90] 燕丽萍, 夏阳, 毛秀红, 等. 转 *BADH* 基因紫花苜蓿山苜 2 号品种的抗盐性鉴定及系统选育[J]. *植物学报*, 2011, 46(3): 293—301.
- [91] Yan L P, Liu C L, Liang H M, *et al.* Physiological responses to salt stress of T2 alfalfa progenies carrying a transgene for betaine aldehyde dehydrogenase[J]. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 2012, 108: 191—199.

## Adaptation mechanism and cultivation strategy of alfalfa in saline soil

ZHAO Li-xing<sup>1</sup>, WANG Lin<sup>2</sup>, WEN Li<sup>1</sup>, HOU Wei-feng<sup>1</sup>,  
BI Sheng-nan<sup>1</sup>, QI Geqi<sup>1</sup>, SUN Wurina<sup>1</sup>

(1. *Hinggan League Agricultural Sciences Research Institute, Ulanhot 137400, China*; 2. *College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education, Pratacultural Engineering Laboratory of Gansu Province, Sino-U. S. Centers for Grazingland Ecosystem Sustainability, Lanzhou 730070, China*)

**Abstract:** Alfalfa (*Medicago sativa*) is a legume forage with medium tolerance to saline-alkali soil. Planting alfalfa in saline-alkali soil has high economic and ecological benefits. This paper reviewed the adaptive mechanism and cultivation strategy of alfalfa in saline-alkali soil. Under saline-alkali stress, alfalfa maintains metabolic balance by increasing the accumulation of osmotic adjustment substances, increasing antioxidant enzyme activity and protecting membrane system. aAlfalfa inhibits the entry of poisonous ions into the plant and improves the efficiency of water transportation and metabolism by adjusting the tissue structure of roots, stems and leaves. Development of appropriate irrigation and drainage systems enables the transformation of saline-alkali soils and helps to reduce soil salt content. Use of beneficial rhizosphere microorganisms can improve the rhizosphere microenvironment and increase the alfalfa's resistance to environmental stresses. The combination of conventional breeding and genetic engineering technologies is an important approach to breed new varieties with tolerance to salt and alkali. The integration of research methodologies in the fields of plant genetics and breeding, plant physiology and biochemistry, and molecular biology should be the focus of future research on alfalfa's tolerance to soil salinity.

**Key words:** alfalfa; saline-alkali soil; adaptive mechanism; cultivation strategy