



大豆耐盐碱生理机制及种质筛选研究进展

王春雨, 朱冠雄, 田艺心, 高 祺, 华方静, 王士岭, 高凤菊, 曹鹏鹏

(德州市农业科学研究院, 山东 德州 253015)

摘 要:我国盐碱地面积大、分布广,且次生盐碱化问题日益严峻,盐碱地面积的不断增加成为制约农业发展的重要因素,选育能够适应逆境的作物品种是发挥盐碱地生产潜力最主要的途径。大豆属于中度耐盐植物,是世界第四大作物,也是我国重要的粮食、经济和饲料兼用作物,筛选培育优质耐盐碱大豆品种对合理利用盐碱地、促进我国农业可持续发展具有重要意义。本文从盐碱土的类型及对植物的危害、盐碱土对大豆生长的危害、大豆耐盐碱生理机制、耐盐碱大豆种质筛选 4 个方面对大豆耐盐碱性研究现状进行综述,以期为大豆耐盐碱新品种的选育提供理论基础和育种思路。

关键词:大豆;盐碱胁迫;生理机制;种质筛选

Research Progress on Physiological Mechanism of Salt Alkali Tolerance and Germplasm Screening in Soybean

WANG Chunyu, ZHU Guanxiong, TIAN Yixin, GAO Qi, HUA Fangjing, WANG Shiling, GAO Fengju, CAO Pengpeng

(Dezhou Academy of Agricultural Sciences, Dezhou 253015, China)

Abstract: The saline and alkaline land in China is large and widely distributed, and the secondary salinization problem is becoming increasingly serious. The increasing area of saline and alkaline land has become an important factor restricting the development of agriculture, therefore the selection and breeding of crop varieties that can adapt to the adversity is the most important way to exert the production potential of saline and alkaline land. Soybean is a moderately salt-tolerant plant, the fourth largest crop in the world, and an important food, economic and feed crop in China. It is of great significance to screen and cultivate high-quality saline-tolerant soybean varieties to rationally utilize saline-alkaline land and promote the sustainable development of China's agriculture. This paper summarized the current status of soybean salinity tolerance research from four aspects: the type of solonchak and the harm to plants, the harm of solonchak to soybean growth, the physiological mechanism of soybean salinity tolerance, and the screening of salinity-tolerant soybean germplasm, aiming to provide a theoretical basis for the selection and breeding of new salinity-tolerant varieties of soybean and breeding ideas.

Keywords: soybean; saline-alkali stress; physiological mechanism; germplasm screening

盐碱土面积约占全球陆地面积的 $1/4 \sim 1/3$ ^[1]。我国盐碱地不仅面积大,且分布广,据统计,我国现有盐碱土面积达 $9.15 \times 10^7 \text{ hm}^2$,主要分布在高原地区、黄淮海平原、西北干旱地区和东北三江平原、松嫩平原西部^[2]。不合理的施肥和灌溉方式导致次生盐碱化土地的问题日益严峻,预计到 2040 年我国约 43% 以上的耕地将受到盐碱化影响,严重限制我国农业可持续发展,因此盐碱地土壤资源的保护和合理利用显得尤为迫切和重要^[3-5]。大豆是世界第四大作物,也是种植面积最大的油料作物^[6]。在我国,大豆是重要的经济、粮食和饲料兼用作物,产量仅次于水稻、小麦和玉米,是我国第四大粮食作物,

有悠久的栽培历史^[7]。成熟大豆种子富含丰富的植物蛋白和油脂,有极高的利用价值^[8]。栽培大豆属于中度耐盐作物,种植适应逆境的品种是发挥盐碱地生产潜力最主要的途径^[9]。因此探究盐碱胁迫对大豆的影响对于研究和开发耐盐碱大豆品种,提高大豆的产量和品质,提高土地利用率,增加农民收入和农业经济效益,促进我国农业可持续发展均具有重要的理论和实践意义。本文从盐碱土的类型及对植物的危害、盐碱土对大豆生长的危害、大豆耐盐碱生理机制研究、耐盐碱大豆种质的筛选等 4 个方面对大豆耐盐碱性研究现状进行综述,以期为大豆耐盐碱新品种的选育提供理论基础和育种思路。

收稿日期:2023-08-01

基金项目:国家大豆产业技术体系建设项目(CARS-04-CES31);山东省杂粮产业技术体系建设项目(SDAIT-5-01);山东省农业良种工程项目(2021LZGC025)。

第一作者:王春雨(1995—),女,硕士,助理农艺师,主要从事大豆及杂粮栽培育种研究。E-mail:824181971@qq.com。

通讯作者:曹鹏鹏(1983—),男,学士,高级农艺师,主要从事大豆及杂粮栽培育种研究。E-mail:1983caopeng@163.com;

高凤菊(1969—),女,硕士,推广研究员,主要从事大豆及杂粮栽培育种研究。E-mail:gjf1970@126.com。

1 盐碱土的类型及对植物的危害

盐碱土形成的自然条件、成土过程、类型特点不尽相同,因此分类原则和标准尚未统一。我国将盐碱土分为盐土和碱土两大类,其中盐土又分为滨海盐土、草甸盐土、潮盐土、典型盐土、沼泽盐土、洪积盐土、残余盐土和碱化盐土 8 个亚类,碱土可分为草甸碱土、草原碱土、龟裂碱土和镁质碱土 4 个亚类^[10-11]。盐碱土壤所含的氯化盐、硫酸盐、碳酸盐和碳酸氢盐高于正常土壤,根据主要盐分类型的不同,将氯化盐和硫酸盐危害的土壤称为盐土,特点是盐度升高,对植物造成盐胁迫;将碳酸盐和碳酸氢盐危害的土壤称为碱土,特点是盐度和 pH 值都升高,对植物造成碱胁迫,二者同时存在的情况称为盐碱胁迫。

盐碱胁迫主要从破坏植物细胞离子均衡、破坏细胞跨膜电化式和影响植物的生物大分子结构三个方面对植物产生危害^[12]。盐化土壤最明显的特征就是盐离子浓度过高,土壤渗透压升高,植物根系受到渗透胁迫,导致植物根系丧失吸收水分的能力,植物根系被迫失水后还会破坏植物细胞的离子平衡,正常的离子代谢受到干扰,当植物体内的钠离子和氯离子浓度超过耐受范围后,会对植物造成离子毒害作用,影响正常的新陈代谢,从而影响养分的吸收,严重时导致植物中毒死亡^[13]。碱性土的高 pH 会降低土壤中酶的活性,影响土壤微生物的活动和有机质的转化,造成土壤肥力下降等问题,相较中性盐,碱性盐对土壤的理化性质产生更大的不良影响^[14-15]。高 pH 值的土壤环境会使金属离子及含磷化合物沉淀,显著影响根系对 Na⁺、K⁺、NO₃⁻、H₂PO₄⁻ 等无机离子的吸收,严重时破坏植物根细胞的结构与功能,破坏根系对氧气的吸收功能,造成细胞内离子失衡和 pH 值失衡,还可以间接

通过影响光合作用对植物产生伤害^[16],这是高 pH 值碱胁迫比中性盐胁迫对植物造成伤害更大的主要原因。我国碱土面积超过盐土,由碱性盐(如 Na₂CO₃、NaHCO₃ 等)造成的土壤盐碱化问题比中性盐(如 NaCl、Na₂SO₄ 等)造成的土壤盐化问题更严重,也更于难解决^[17]。

2 盐碱土对大豆生长的危害

大豆作为中度耐盐作物,当土壤盐碱含量过高,电导率超过 5 dS·m⁻¹时,百粒重、单株粒重、生育期、收获指数、单株干物质量等产量构成因素均会受到不同程度的影响,最终导致大豆产量降低^[18-19]。我国大豆三大主产区盐碱土类型信息详见表 1。研究表明,低浓度的中性盐对大豆的萌发和生长发育具有一定促进作用,低浓度的碱性盐对大豆的生长抑制作用也不明显,这是因为当生长环境的盐碱浓度在大豆的耐受范围内时,植物体内相关酶活性受到刺激而提高,从而表现出一定的促进生长发育作用^[20]。对于中性盐而言,盐胁迫会导致大豆株高降低、分枝减少、百粒重降低、单株粒数和单株荚数均减少,这种影响在盐敏感品种上的表现较耐盐品种更为明显^[21]。对于碱性盐而言,碱性盐胁迫意味着较高的土壤 pH 值,pH 值过高会降低养分的溶解度,导致重要的矿物质离子沉淀,植物缺乏营养,表现出叶绿化和发育迟缓^[22]。其次,较高的 pH 值会影响叶片正常的气体交换,降低植物的光合速率和蒸腾速率,当 pH 值超过 8.84 时,植物根系的吸收活动也明显受到抑制,膜结构受到破坏,根细胞无法正常进行代谢,根系活力降低,导致更为严重的毒害作用^[23]。大豆的各项生态指标在碱胁迫时下降程度高于盐和盐碱的混合胁迫,这说明碱胁迫对大豆的危害比中性盐胁迫和盐碱混合胁迫的程度更大^[24]。

表 1 我国大豆主产区盐碱土类型^[10]
Table 1 Types of saline alkaline soil in the main soybean production areas of China^[10]

区域 Area	省(市、区) Province (city, district)	主要盐碱土类型 Main types of saline alkali soil
东北地区 Northeast	黑龙江	盐土;草甸盐土、沼泽盐土;碱土;草甸碱土
	辽宁	盐土;草甸盐土、滨海盐土、潮盐土、沼泽盐土、碱化盐土
	吉林	盐土;草甸盐土、沼泽盐土、碱化盐土;碱土;草甸碱土
黄淮海流域 Huang-Huai-Hai river basin	天津	盐土;滨海盐土、潮盐土
	陕西	盐土;草甸盐土、潮盐土、沼泽盐土、残余盐土
	山东	盐土;滨海盐土、沼泽盐土、潮盐土
	河北	盐土;草甸盐土、次生盐土、沼泽盐土、典型盐土、残余盐土、潮盐土、洪积盐土
	河南	盐土;潮盐土、草甸盐土;碱土;草甸碱土
	江苏	盐土;滨海盐土;碱土;草甸碱土
长江流域 Yangtze river basin	浙江	盐土;滨海盐土
	上海	盐土;滨海盐土

大豆产量受单株粒重、单株荚数、百粒重等多个产量构成因素的影响,栽培大豆产量一般为 $2\,250 \sim 3\,750\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,盐碱胁迫会影响大豆生长发育,造成减产甚至绝收^[25-26]。肖鑫辉等^[18]研究发现,在高盐土壤条件下单株粒数与单株籽粒产量相关性显著,可作为高盐条件下高产大豆种质的筛选指标。Abel 等^[27]研究表明,盐胁迫降低大豆萌芽速度和出苗率,最终导致大豆产量降低 30%,百粒重下降 23%。常汝镇等^[28]研究表明,盐胁迫条件下,大豆单株荚数、单株粒数和单株粒重下降程度最大,其次是百粒重下降,主茎节数减少程度和株高降低幅度相对较小,最终表现为大豆产量降低。研究表明,使用生物炭、微生物菌剂、钙抑制剂等土壤改良剂和预先铺设地膜、起垄栽培等栽培措施的改良均能降低耕层土壤含盐量,缓解盐碱胁迫对植物造成的伤害,提高盐碱地种植作物的产量^[29-31]。但针对大豆相关的研究较少,探索能够缓解盐碱胁迫伤害的大豆配套栽培措施,通过盐碱治理措施降低土壤盐碱度,加强盐碱地大豆栽培管理,尽可能满足大豆生长发育所需的水、肥等营养成分,是发挥优质种质资源生产潜能的重要途径。

盐碱胁迫导致大豆产量降低是现阶段研究认可的结论,但盐碱胁迫对大豆品质影响的研究较少。有研究表明,在 $14 \sim 15\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 低盐浓度下大豆籽粒蛋白质、脂肪含量降低, $18 \sim 20\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 高盐浓度下蛋白质含量极显著提高,脂肪含量极显著降低,但这种变化是否在大豆群体中普遍存在,以及造成这种现象的生理机制尚不明确^[32]。研究盐碱胁迫对大豆品质的影响可以为耐盐碱大豆品种的品质改良提供重要的理论依据和实践途径。

3 大豆耐盐碱生理机制研究

3.1 盐碱胁迫下大豆体内无机离子的调节机制

土壤中盐分含量增高相对应土壤渗透势降低,植物根部难以从土壤中吸取水分,导致植物生理性干旱,进而产生植物体萎蔫、叶片枯黄等现象,严重时植物体死亡^[33]。过量的 Na^+ 和 Cl^- 进入植物细胞后还会严重破坏植物细胞离子代谢平衡,破坏植物体内膜脂质结构,使酶活性降低甚至丧失,最终导致植物的整体细胞代谢循环和生理代谢过程受到严重干扰和破坏^[34-35]。因此,处于盐碱胁迫环境中的植物需要主动吸收外界无机离子,提高自身细胞内溶质浓度,以建立细胞内外水势梯度,保证细胞根系正常吸收外界水分。参与这个过程的无机离子主要是 Na^+ 、 Cl^- 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 等^[36]。邵帅^[37]以野生大豆作为研究对象,发现随着中性盐胁迫程度的增加,其根、茎、叶中的 Na^+ 、 Cl^- 和 SO_4^{2-}

含量增加,在碱性胁迫下,野生大豆茎叶中 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 NO_3^- 含量均增加, Cl^- 含量降低。此外,高等植物中普遍存在离子的区域化作用,即高等植物在受到盐胁迫时,往往把盐从细胞质和细胞器中清除出去,使其集中于液泡中的现象。离子区域化作用也能一定程度上维持叶泡膨压,有利于水分进入细胞,降低盐碱胁迫对植物的伤害^[38]。

3.2 盐碱胁迫下大豆体内的渗透调节机制

可溶性糖和植物体内游离的脯氨酸是维持植物细胞渗透压平衡的重要物质^[39]。当植物处于干旱、盐碱胁迫等逆境时,体内游离的脯氨酸和可溶性糖会大量积累,直接参与渗透调节过程,起到稳定生物大分子结构、降低细胞酸性、解除氨毒等作用^[40]。同时脯氨酸还具有一定的调节氧化还原作用。研究表明,大豆受到盐碱胁迫时,脯氨酸和可溶性糖含量先是随盐分浓度的升高而增加,但升高到一定水平后二者浓度不再增加甚至降低^[41]。原因是盐碱胁迫处理后,大豆体内缺乏碳源,脯氨酸合成受到影响,因此呈现出含量的增加趋势减弱甚至消失^[42]。可溶性糖含量降低的原因是大豆进行呼吸作用消耗了糖,但盐碱胁迫环境导致根部运输的可溶性糖含量减少,供需不平衡导致糖含量下降^[43]。添加外源辅助因子水杨酸(SA)可以在一定程度上增加大豆体内脯氨酸和可溶性糖含量,且外源 SA 处理对脯氨酸含量的增加效果比可溶性糖含量的增加更明显,这种辅助效果在低浓度盐胁迫时更明显,因此添加外源水杨酸对盐碱胁迫造成的伤害能起到一定的缓解作用^[44-45]。

3.3 盐碱胁迫下大豆体内的活性氧调节机制

正常情况下,大豆体内活性氧系统处于动态平衡状态,大豆受到外界盐碱胁迫时,活性氧系统的调节能力受到影响,当失去动态平衡时,大豆的生长发育受到影响,植株受到损伤。因此大豆体内活性氧调节机制对抵御盐碱胁迫也起着重要的作用。超氧化物歧化酶(SOD)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)、过氧化氢酶(CAT)及过氧化物酶(POD)等活性酶和类胡萝卜素(CAR)、谷胱甘肽(GSH)及抗坏血酸(ASA)等非酶物质是参与活性氧调节机制的主要物质^[46]。大豆植株通过增加 SOD 和 POD 的含量、降低 MDA 的含量来提高自身耐盐性^[47]。MDA 是能够反映细胞过氧化水平的脂质过氧化的产物。在一定范围内,大豆的耐盐碱能力越高,非酶物质的含量也越高^[48]。喷施适当浓度的 α -萘乙酸(NAA)能降低大豆氧化损伤,有助于维持膜系统结构^[49]。2,4-表油菜素内酯(EBR)能够提高大豆抗氧化酶活性,降低植株活性氧水平^[50]。添加水杨酸(SA)能增强大豆幼苗 SOD 和 POD 活性,提高 GSA 含量,有助于植物抵抗盐碱胁迫^[51]。以上研究

表明,添加适当的外源辅助因子对提高大豆耐盐碱抗性和降低盐碱胁迫危害具有重要意义,是今后盐碱地开发应用的一个途径。

4 耐盐碱大豆种质的筛选

植物在不同生长发育阶段,如萌发期、苗期、花期、成熟期等表现出不同程度的耐盐碱抗性,且不同生育阶段的耐盐碱抗性没有明显的相关性^[52-53]。原因一是耐盐碱基因在不同生育阶段的表达程度不同,基因表达是随着生长分化的变化而变化;二是在作物在不同的生育阶段,发挥主要作用的抵御机制不同^[54-56]。研究表明,耐盐碱抗性最弱的阶段是植物的萌发期和幼苗期,其次是生殖生长阶段,其他生长发育期对盐碱胁迫的敏感性相对较低^[57-59]。盐碱胁迫不同于干旱胁迫、低温胁迫等生物因素胁迫具有的突发性和阶段性特点,盐碱胁迫一般伴随植物整个生育期。在实际生产中,保证作物苗全和苗壮是高产稳产的基础,因此,在盐碱胁迫环境下,大豆种子能够正常萌发是保障后续生长发育的关键因素,而整个生育期均表现出良好耐盐碱抗性获得大豆高产稳产的重要因素,探索建立可以筛选大豆全生育期耐盐碱鉴定方法,对获得表现良好的耐盐碱种质资源至关重要。

目前耐盐碱鉴定方法主要分为室内鉴定和室外大田鉴定。室内鉴定具有时间短、容量大、重复性强、干扰因素少等优点,但其筛选结果不一定完全适用于实际生产;室外大田鉴定更贴合实际生产,具有更高的应用价值,但容易受环境、气候等因素影响^[60]。因此将室内鉴定与室外大田鉴定相结合应是今后研究的重点。室内鉴定可选择多种培养介质。邵桂花等^[21]建立了一种培养皿萌发期鉴定法,鉴定大豆萌发期耐盐碱性,利用一定浓度的 NaCl 、 Na_2CO_3 、 Na_2SO_4 溶液处理大豆种子,通过调查发芽数鉴定大豆萌发率和种子活力。王敏等^[61]建立了营养液筛选法。卫秀英等^[62]利用沙培法进行大豆耐盐鉴定。肖鑫辉等^[63]利用895份野生大豆单株,进行室外鉴定,以野生大豆植株在胁迫处理条件下的存活时间为指标,结合 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Cl^- 含量5个指标的隶属函数值,鉴定野生大豆的耐盐碱性。Zhou等^[64]建立了一份基于图像的表型系统,通过提取受损叶面积与冠层面积的比值作为一种新的图像特征量化耐盐等级,可以自动收集、处理和分析控制环境下大豆品种对盐胁迫的响应。现阶段大多数研究选择用单一类型盐溶液模拟盐碱胁迫环境,且多为中性盐溶液,针对碱性盐造成的碱胁迫和盐碱混合胁迫的研究相对较少。我国盐渍土类型复杂多样,实验室模拟盐碱胁迫环境筛选出来的大豆品种不一定完全适合大田生产

中应用。目前尚缺乏统一的耐盐碱筛选标准也是导致筛选出的大豆品种耐盐碱能力参差不齐的原因之一。

良好的耐盐碱抗性与大豆体内的抗性基因息息相关。挖掘耐盐碱基因能够揭示其在耐盐碱过程中的分子功能,有助于阐明大豆的耐盐碱机理,也有助于为耐盐碱大豆品种的培育提供优质基因来源,加速大豆抗性育种进程。利用基因工程将野生耐盐碱大豆的抗性基因转入普通栽培大豆品种中,能够定向改变大豆的遗传特性,缩短育种进程,最终培育成具有抗盐碱性的大豆新品种。

5 展望

盐碱胁迫严重制约我国农业发展,筛选培育优良的耐盐碱大豆品种对提高盐碱地利用率具有重要意义。耐盐碱大豆的室内鉴定和室外大田鉴定各有优缺点,室内鉴定的优点是具有较高的可控性,但不能完全模拟实际生产条件,如何结合二者提高鉴定效率,筛选真正适合大田生产的抗性品种是亟需解决的问题。同时,制定统一的鉴定标准,在接近实际生产的田间进行全生育期的耐盐碱性鉴定,针对不同的盐碱土类型,精准筛选适合该地区种植栽培的大豆品种是未来研究的重点。为进一步提高大豆的耐盐碱能力,应加强关于添加外源辅助因子对提高大豆耐盐碱能力的研究,良好的抗性品种配合合理的栽培方式能够最大程度发挥生产潜力。此外,利用现代分子技术,挖掘耐盐碱大豆的抗性基因,为选育大豆耐盐碱新品种奠定基础。

参考文献

- [1] 赵可夫. 植物抗盐生理[M]. 北京: 中国科技出版社, 1993. (ZHAO K F. Salt-tolerant physiology of plants [M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1993.)
- [2] 唐于银, 乔海龙. 我国盐渍土资源及其综合利用研究进展[J]. 安徽农学通报, 2008, 14(8): 19-22. (TANG Y Y, QIAO H L. Research progress of saline soil resources and its comprehensive utilization in China [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2008, 14(8): 19-22.)
- [3] NAN J, CHEN X, CHEN C, et al. Impact of flue gas desulfurization gypsum and lignite humic acid application on soil organic matter and physical properties of a saline-sodic farmland soil in Eastern China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2016, 16(9): 2175-2185.
- [4] 周宾. 添加脱硫石膏对苏打盐碱土理化性质及水稻产量的影响[J]. 山西农业科学, 2022, 50(3): 386-390. (ZHOU B. Effects of desulfurization gypsum on physical and chemical properties and rice yield in soda alkali-saline soil [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2022, 50(3): 386-390.)
- [5] 刘森, 王志春, 杨福, 等. 生物炭在盐碱地改良中的应用进展[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3): 1-8. (LIU M, WANG Z C, YANG F, et al. Application progress of biochar in amelioration

- of saline-alkaline soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3): 1-8.)
- [6] 高宇, 孙晨棋, 罗英, 等. 中国大豆种子处理剂应用现状及研究进展[J]. 大豆科学, 2022, 41(5): 617-623. (GAO Y, SUN C Q, LUO Y, et al. Research and application development of soybean seed treatment agent in China[J]. Soybean Science, 2022, 41(5): 617-623.)
- [7] 王靖会, 刘洋, 郑淇友, 等. 基于多元素和脂肪酸指纹特征的中国北方大豆产地鉴别研究[J]. 中国油料作物学报, 2022, 44(3): 532-538. (WANG J H, LIU Y, ZHENG Q Y, et al. Identification of soybean producing area in North China based on multi-element and fatty acid fingerprint characteristics [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2022, 44(3): 532-538.)
- [8] 张海泉, 王铁军. 大豆育种工作的现状与展望[J]. 沈阳农业大学学报, 2000, 31(4): 375-379. (ZHANG H Q, WANG T J. Advance and prospect on soybean breeding [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2000, 31(4): 375-379.)
- [9] 那桂秋, 寇贺, 曹敏建. 不同大豆品种种子萌发期耐盐碱性鉴定[J]. 大豆科学, 2009, 28(2): 352-356. (NA G Q, KOU H, CAO M J. Salt and alkaline tolerance evaluation of different soybean varieties at germination stage [J]. Soybean Science, 2009, 28(2): 352-356.)
- [10] 杨真, 王宝山. 中国盐渍土资源现状及改良利用对策[J]. 山东农业科学, 2015, 47(4): 125-130. (YANG Z, WANG B S. Present status of saline soil resources and countermeasures for improvement and utilization in China[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2015, 47(4): 125-130.)
- [11] SUN Y P, YANG J S, YAO R J, et al. Biochar and fulvic acid amendments mitigate negative effects of coastal saline soil and improve crop yields in a three year field trial [J]. Scientific Reports, 2020, 10: 8946.
- [12] 王鑫, 马永祥, 李娟. 紫花苜蓿营养成分及主要生物学特性[J]. 草业科学, 2003, 20(10): 39-41. (WANG X, MA Y X, LI J. Fat-breeding effects of full-grazing Turkey on regressed grassland[J]. Pratacultural Science, 2003, 20(10): 39-41.)
- [13] 季平. 不同类型盐碱胁迫对大豆植株生长性状和产量的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2013. (JI P. Effects of different types of salt and alkaline stress on growth traits of plant and yield in different soybean cultivars[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2013.)
- [14] 曾华. 植物耐盐碱机制研究进展[J]. 北方水稻, 2017, 47(2): 58-61. (ZENG H. Research progress on saline-alkali tolerance mechanism of plants[J]. North Rice, 2017, 47(2): 58-61.)
- [15] YANG Z, WANG B S. Progress in techniques of improvement and utilization of saline-alkali land in China and its future trend[J]. Open Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 2(1): 1-11.
- [16] 石德成, 殷立娟. Na₂CO₃ 胁迫下羊草苗的胁迫反应及其数学分析[J]. 植物学报, 1992, 34(5): 386-393. (SHI D C, YIN L J. Strain responses in naco3-stressed *Leymus chinensis* seedlings and their mathematical analysis[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 1992, 34(5): 386-393.)
- [17] 杨微. 盐碱化土壤中四种常见盐分对碱地肤的胁迫作用比较[D]. 长春: 东北师范大学, 2007. (YANG W. Stress comparison among four main salts in salt-alkalized soil on *Kochia sieversiana* [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2007.)
- [18] 肖鑫辉, 李向华, 刘洋, 等. 高盐碱环境下野生大豆主要性状与单株产量的相关分析[J]. 大豆科学, 2009, 28(4): 616-622, 627. (XIAO X H, LI X H, LIU Y, et al. Correlation and path analysis of major agronomic characters and yield of wild soybean (*Glycine soja*) under high saline soil [J]. Soybean Science, 2009, 28(4): 616-622, 627.)
- [19] ASHRAF M, WU L. Breeding for salinity tolerance in plants[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 1994, 13(1): 17-42.
- [20] 刘玉兰, 陈殿元, 元明浩, 等. 盐胁迫对小粒大豆幼苗生长发育及光合特性的影响[J]. 大豆科学, 2017, 36(6): 913-920. (LIU Y L, CHEN D Y, YUAN M H, et al. Effects of salt stress on seedling growth and photosynthetic characteristics of *Glycine gracilis*[J]. Soybean Science, 2017, 36(6): 913-920.)
- [21] 邵桂花, 万超文, 李舒凡. 大豆萌发期耐盐生理初步研究[J]. 作物杂志, 1994(6): 25-27. (SHAO G H, WAN C W, LI S F. Preliminary study on salt tolerance physiology of soybean during germination[J]. Crops, 1994(6): 25-27.)
- [22] ZOCCHI G, DE NISI P, DELL'ORTO M, et al. Iron deficiency differently affects metabolic responses in soybean roots[J]. Journal of Experimental Botany, 2007, 58(5): 993-1000.
- [23] 卢艳丽. 燕麦与不同作物混作抗盐碱生理特性的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008. (LU Y L. Study on resistance saline-alkali physiological characteristics mixed sowing different crops and oats[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2008.)
- [24] 季平, 张鹏, 徐克章, 等. 不同类型盐碱胁迫对大豆植株生长性状和产量的影响[J]. 大豆科学, 2013, 32(4): 477-481. (JI P, ZHANG P, XU K Z, et al. Effects of salt and alkaline stress on plant growth traits and yield of soybean [J]. Soybean Science, 2013, 32(4): 477-481.)
- [25] 张海燕, 焦碧婵, 李贵全. 大豆产量及其相关数量性状关系的分析[J]. 山西农业科学, 2006, 34(2): 27-29. (ZHANG H Y, JIAO B C, LI G Q. Analysis on the relationship between yield and correlated quantitative character of soybean [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2006, 34(2): 27-29.)
- [26] 周蓉, 陈海峰, 王贤智, 等. 大豆产量和产量构成因子及倒伏性的 QTL 分析[J]. 作物学报, 2009, 35(5): 821-830. (ZHOU R, CHEN H F, WANG X Z, et al. QTL analysis of yield, yield components, and lodging in soybean [J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(5): 821-830.)
- [27] ABEL G H. Inheritance of the capacity for chloride inclusion and chloride exclusion by Soybeans I [J]. Crop Science, 1969, 9(6): 697-698.
- [28] 常汝镇, 陈一舞, 邵桂花, 等. 盐对大豆农艺性状及籽粒品质的影响[J]. 大豆科学, 1994, 13(2): 101-105. (CHANG R Z, CHEN Y W, SHAO G H, et al. Effect of salt on agricultural characters and chemical quality of seed in soybeans [J]. Soybean Science, 1994, 13(2): 101-105.)
- [29] 徐婷, 柳延涛, 王海江. 不同改良剂对盐碱地花生生长特性和产量的影响[J]. 西南农业学报, 2023, 36(1): 62-74. (XU T, LIU Y T, WANG H J. Effects of different modifiers on growth characteristics and yield of peanut in saline alkali soil [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2023, 36(1): 62-74.)
- [30] 张谦, 冯国艺, 雷晓鹏, 等. 滨海盐碱地预覆膜起垄的生态效应及对棉花苗期的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(4): 74-79. (ZHANG Q, FENG G Y, LEI X P, et al.

- Ecological effects of early plastic mulching and ridging and its effect on seedling stage of cotton in coastal saline soil [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(4): 74-79.)
- [31] 崔必波, 韩勇, 王伟义, 等. 起垄覆膜与土壤脱盐剂对江苏沿海中重度盐碱地棉花成苗和产量的影响[J]. 棉花学报, 2016, 28(4): 339-344. (CUI B B, HAN Y, WANG W Y, et al. Cotton response in seedling establishment and yield to ridging with mulching film and soil desalting agent on moderate to severe coastal saline soil [J]. Cotton Science, 2016, 28(4): 339-344.)
- [32] 万超文, 邵桂花, 陈一舞, 等. 盐胁迫下大豆耐盐性与籽粒化学品质的关系[J]. 中国油料作物学报, 2002, 24(2): 67-72. (WAN C W, SHAO G H, CHEN Y W, et al. Relationship between salt tolerance and chemical quality of soybean under salt stress [J]. Chinese Journal of Oil Crop Scieives, 2002, 24(2): 67-72.)
- [33] 赵秀坊. 大豆 *GmsSOS1* 基因通过增强抗氧化酶活性提高拟南芥耐盐性的初步研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2016. (ZHAO X F. Preliminary research on salt tolerance improvement of *GmsSOS1 Arabidopsis thaliana* by enhancing antioxidant enzyme activities [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016.)
- [34] 郭全恩. 土壤盐分离子迁移及其分异规律对环境因素的响应机制 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010. (GUO Q E. The response mechanism of soil salt ions transfer and diversity rule to environment factor [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2010.)
- [35] 李国雷. 盐胁迫下 13 个树种反应特性的研究 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2004. (LI G L. Study on the effects of salt stress on 13 tree species [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2004.)
- [36] 魏志园, 杨杰, 王宇, 等. 野生大豆耐盐碱种质鉴定及其机制研究进展[J]. 河北科技师范学院学报, 2020, 34(3): 26-32. (WEI Z Y, YANG J, WANG Y, et al. Advancement on germplasm identification and resistance mechanism of wild soybean to saline-alkali stress [J]. Journal of Hebei Normal University of Science & Technology, 2020, 34(3): 26-32.)
- [37] 邵帅. 盐碱胁迫下野生大豆幼苗光合特性与离子动态平衡研究 [D]. 长春: 东北师范大学, 2012. (SHAO S. Research on photosynthetic characteristics and ion homeostasis of *Glycine soja* seedlings under saline and alkaline stresses [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2012.)
- [38] BINZEL M L, HESS F D, BRESSAN R A, et al. Intracellular compartmentation of ions in salt adapted tobacco cells [J]. Plant Physiology, 1988, 86(2): 607-614.
- [39] 史凤玉, 龙茹, 朱英波, 等. 野生大豆 (*Glycine soja* L.) 耐盐性研究进展[J]. 河北科技师范学院学报, 2008, 22(1): 69-72. (SHI F Y, LONG R, ZHU Y B, et al. Research progress in salt-tolerance ability of wild soybean (*Glycine soja* L.) [J]. Journal of Hebei Normal University of Science & Technology, 2008, 22(1): 69-72.)
- [40] 焦蓉, 刘好宝, 刘贯山, 等. 脯氨酸累积与植物抗渗透胁迫 [J]. 中国农学通报, 2011, 27(7): 216-221. (JIAO R, LIU H B, LIU G S, et al. Discussion of accumulation of proline and its relationship with osmotic stress tolerance of plants [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(7): 216-221.)
- [41] 张婷婷, 杨美英, 王春红, 等. 盐碱胁迫下不同水稻品种渗透调节物质及相关基因的变化[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(4): 39-47. (ZHANG T T, YANG M Y, WANG C H, et al. Changes in osmolytes and related genes of different rice varieties under saline-alkali stress [J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2016, 44(4): 39-47.)
- [42] 张美云, 钱吉, 郑师章. 渗透胁迫下野生大豆游离脯氨酸和可溶性糖的变化[J]. 复旦学报(自然科学版), 2001, 40(5): 558-561. (ZHANG M Y, QIAN J, ZHENG S Z. Studies on free proline and soluble sugar of wild soybeans (*Glycine soja*) under osmotic stress [J]. Journal of Fudan University, 2001, 40(5): 558-561.)
- [43] 李姝睿. 盐胁迫对芸豆体内可溶性糖含量的影响[J]. 青海师范大学学报(自然科学版), 2003, 19(2): 65-66, 84. (LI S R. The content of the soluble sugar of kindey bean in the brine conditions [J]. Journal of Qinghai Normal University (Natural Science Edition), 2003, 19(2): 65-66, 84.)
- [44] 刘爱荣, 张远兵, 王桂芹, 等. 水杨酸对盐胁迫下大豆生长和渗透调节能力的影响[J]. 中国林副特产, 2006(5): 27-29. (LIU A R, ZHANG Y B, WANG G Q, et al. Effect of salicylic acid on the under-stress growth and penetrating adjustment capability of soybean [J]. Forest by-Product and Speciality in China, 2006(5): 27-29.)
- [45] 关洪斌, 于卫霞, 田明忠, 等. 海水胁迫下水杨酸对绿豆种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(5): 1748-1749. (GUAN H B, YU W X, TIAN M Z, et al. Effects of the salicylic acid on seed germination and seedling growth under seawater stress [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(5): 1748-1749.)
- [46] 白英俊, 李国瑞, 黄凤兰, 等. 活性氧与植物抗氧化系统研究进展[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(36): 1-3. (BAI Y J, LI G R, HUANG F L, et al. Research progress of reactive oxygen species and plant antioxidant system [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(36): 1-3.)
- [47] 刘浩然. 不同大豆品种对干旱和盐胁迫的生理响应机制 [D]. 保定: 河北大学, 2018. (LIU H R. Physiological response mechanism of different soybean varieties resistant to drought and salt stress [D]. Baoding: Hebei University, 2018.)
- [48] 刘国花. 盐胁迫对豌豆幼苗生理指标的影响[J]. 湖北农业科学, 2007, 46(3): 366-368. (LIU G H. Effects of NaCl stress on the physiological indicator in pea seedlings [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2007, 46(3): 366-368.)
- [49] 奚广生, 王艳玲. 外源激素对野生大豆耐盐性的影响[J]. 大豆科学, 2007, 26(6): 972-974. (XI G S, WANG Y L. Effect of exogenous phytohormones on salt tolerance in *Glycine soja* [J]. Soybean Science, 2007, 26(6): 972-974.)
- [50] 吴杨, 高慧纯, 张必弦, 等. 24-表油菜素内酯对盐碱胁迫下大豆生育、生理及细胞超微结构的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(5): 811-821. (WU Y, GAO H C, ZHANG B X, et al. Effects of 24-brassinolide on the fertility, physiological characteristics and cell ultra-structure of soybean under saline-alkali stress [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(5): 811-821.)
- [51] 王艳, 杨晓杰. 水杨酸对大豆幼苗盐伤害的缓解效应[J]. 中国农学通报, 2005, 21(8): 172-174. (WANG Y, YANG X J. Mitigative effect of salicylic acid on salt stress injuries in soybean seedlings [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(8): 172-174.)
- [52] 张彦威, 刘国峰, 李伟, 等. 黄淮海地区大豆种质资源耐盐性

鉴定[J]. 山东农业科学, 2018, 50(11): 33-36. (ZHANG Y W, LIU G F, LI W, et al. Identification on salt tolerance of soybean germplasms in Huang-Huai-Hai region [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2018, 50(11): 33-36.)

[53] 刘谢香, 常汝镇, 关荣霞, 等. 大豆出苗期耐盐性鉴定方法建立及耐盐种质筛选[J]. 作物学报, 2020, 46(1): 1-8. (LIU X X, CHANG R Z, GUAN R X, et al. Establishment of screening method for salt tolerant soybean at emergence stage and screening of tolerant germplasm [J]. Acta Agronomica Sinica, 2020, 46(1): 1-8.)

[54] HOSSEINI M K, POWELL A A, BINGHAM I J. Comparison of the seed germination and early seedling growth of soybean in saline conditions[J]. Seed Science Research, 2002, 12(3): 165-172.

[55] GONG B, WANG X, WEI M, et al. Overexpression of S-adenosylmethionine synthetase 1 enhances tomato callus tolerance to alkali stress through polyamine and hydrogen peroxide cross-linked networks[J]. Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC), 2016, 124(2): 377-391.

[56] 范富, 张庆国, 郜继承, 等. 通辽市盐碱地形成及类型划分 [J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2009, 24(4): 409-413. (FAN F, ZHANG Q G, TAI J C, et al. The formation and classification of saline-alkali soil in Tongliao city [J]. Journal of Inner Mongolia University for Nationalities (Natural Sciences), 2009, 24(4): 409-413.)

[57] MCCOY T J. Tissue culture evaluation of NaCl tolerance in *Medicago* species: Cellular versus whole plant response [J]. Plant Cell Reports, 1987, 6(1): 31-34.

[58] 龚明, 刘友良, 丁念诚, 等. 大麦不同生育期的耐盐性差异 [J]. 西北植物学报, 1994, 14(1): 1-7. (GONG M, LIU Y L, DING N C, et al. Difference of salt tolerance in *Hordeum vulgare* at different growth stages [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 1994, 14(1): 1-7.)

[59] AL-KHATIB M, MCNEILLY T, COLLINS J C. The potential of selection and breeding for improved salt tolerance in lucerne (*Medicago sativa* L.) [J]. Euphytica, 1992, 65(1): 43-51.

[60] 徐爱玲, 李扬林, 李孟良. 不同种植密度对五河野生大豆生长及产量的影响[J]. 安徽科技学院学报, 2014, 28(4): 14-17. (XU A L, LI Y L, LI M L. Effects of different density to the growth and yield of Wuhe wild soybean [J]. Journal of Anhui Science and Technology University, 2014, 28(4): 14-17.)

[61] 王敏, 朱怀梅, 苏琳婧, 等. 野生大豆耐盐性材料初步筛选 [J]. 河南农业科学, 2005, 34(7): 31-34. (WANG M, ZHU H M, SU L J, et al. Preliminary screening of salt-tolerant wild soybean materials [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2005, 34(7): 31-34.)

[62] 卫秀英, 汤菊香, 鲁玉贞. 盐胁迫对不同野生大豆种子发芽的影响[J]. 种子, 2008, 27(1): 68-70. (WEI X Y, TANG J X, LU Y Z. Effects of salt stress on germination of seeds of different wild soybean [J]. Seed, 2008, 27(1): 68-70.)

[63] 肖鑫辉, 李向华, 刘洋, 等. 高盐碱胁迫下野生大豆 (*Glycine soja*) 体内离子积累的差异 [J]. 作物学报, 2011, 37(7): 1289-1300. (XIAO X H, LI X H, LIU Y, et al. Difference of ion accumulation in wild soybean (*Glycine soja*) under high saline-alkali stress [J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(7): 1289-1300.)

[64] ZHOU S, MOU H, ZHOU J, et al. Development of an automated plant phenotyping system for evaluation of salt tolerance in soybean [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 182: 106001.

协 办 单 位

中国作物学会大豆专业委员会
东北农业大学大豆研究所
吉林省农业科学院大豆研究所
南京农业大学大豆研究所
辽宁省农业科学院作物研究所
河北省农林科学院粮油作物研究所