



## 48 份大豆种质资源全生育期耐盐碱性评价

张东梅<sup>1</sup>, 赵艳强<sup>2</sup>, 李 晔<sup>3</sup>, 姜 军<sup>4</sup>, 谭 旭<sup>5</sup>, 李双哲<sup>6</sup>, 周志鹏<sup>6</sup>, 叶钰莹<sup>6</sup>, 韩 云<sup>2</sup>, 杨明亮<sup>6,7\*</sup>, 苗兴芬<sup>1\*</sup>

(1. 黑龙江八一农垦大学 农学院, 黑龙江 大庆 163319; 2. 新疆生产建设兵团第四师农业科学研究所, 新疆 可克达拉 835219; 3. 哈尔滨明星农业科技开发有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150038; 4. 黑龙江省农业科学院 大庆分院, 黑龙江 大庆 163319; 5. 逊克县逊河镇农业技术推广服务中心, 黑龙江 逊克 164499; 6. 东北农业大学 农学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 7. 智慧农场技术与系统全国重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150030)

**摘要:**为挖掘大豆种质资源中的优异耐盐碱资源, 筛选出可用于创制耐盐碱品种的优异亲本材料及挖掘相关耐盐碱基因, 本研究对搜集的国外资源及国内农家种、栽培种共 48 份大豆种质资源进行全生育期盐碱胁迫处理, 即全生育期进行 pH9.0 盐碱处理。调查成苗率、单株粒数、种子重量和单株产量; 利用高通量表型平台的 RGB 单元采集 RGB 图像数据测定外接矩形面积、外接圆面积、凸包面积和覆盖率; 利用光合表型成像单元采集光合特性指标测定初始荧光、最大荧光、最大光化学效率、叶绿素指数、花青素指数和叶绿素, 总共 14 个评价指标, 应用相关性分析、主成分分析、隶属函数分析及 *D* 值综合评价法对大豆全生育期耐盐碱性进行综合评价。结果表明: 在盐碱胁迫处理下, 48 份大豆种质资源全生育期 14 个评价指标变化丰富, 变异系数在 4.96% ~ 40.89% 之间。与对照处理相比, 多个指标测量值变异系数上升, 且各指标间呈现极显著或显著相关关系。通过主成分分析将 14 个单一指标转化为 3 个综合指标, 分别是光合指标、形态指标及产量指标。采用 *D* 值综合评价法将参试材料分为 4 大类, 其中公野 03-5570 为高耐盐碱材料, Century 1x13 等 14 份材料为耐盐碱材料, L65-540 等 26 份材料为中间型材料, 小白脐等 7 份材料为不耐盐碱材料, 未鉴定到盐碱敏感材料。

**关键词:**大豆; 盐碱胁迫; 耐盐碱种质资源; 高通量表型鉴定; *D* 值综合评价

## Saline-alkali Tolerance Evaluation of 48 Soybean Germplasm Resources Throughout the Entire Growth Period

ZHANG Dongmei<sup>1</sup>, ZHAO Yanqiang<sup>2</sup>, LI Ye<sup>3</sup>, JIANG Jun<sup>4</sup>, TAN Xu<sup>5</sup>, LI Shuangzhe<sup>6</sup>, ZHOU Zhipeng<sup>6</sup>, YE Yuying<sup>6</sup>, HAN Yun<sup>2</sup>, YANG Mingliang<sup>6,7\*</sup>, MIAO Xingfen<sup>1\*</sup>

(1. College of Agriculture, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, Heilongjiang, China; 2. Agricultural Science Research Institute of the Fourth Division of Xinjiang Production and Construction Corps, Kekedala 835219, Xinjiang, China; 3. Harbin Mingxing Agricultural Technology Development Co., Ltd., Harbin 150038, Heilongjiang, China; 4. Daqing Branch of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Daqing 163319, Heilongjiang, China; 5. Xunke Town Agricultural Technology Extension Service Center, Xunke 164499, Heilongjiang, China; 6. College of Agriculture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, Heilongjiang, China; 7. National Key Laboratory of Smart Farm Technology and Systems, Harbin 150030, Heilongjiang, China)

**Abstract:** In order to explore the excellent saline-alkali tolerance resources within soybean germplasm, this study aims to screen superior parental materials that can be utilized for the development of saline-alkali resistant varieties and to identify relevant saline-alkali tolerance genes. A total of 48 soybean germplasm resources, including foreign collections and domestic landraces and cultivated varieties, were subjected to saline-alkali stress treatment throughout their entire growth period, specifically by applying a pH9.0 saline-alkali treatment during the full growth cycle. Fourteen evaluation indicators were investigated, including: seedling survival rate, number of seeds per plant, seed weight, and yield per plant; external rectangle area, external circle area, convex hull area, and coverage rate measured by collecting RGB image data using a high-throughput phenotypic platform; and initial fluorescence, maximum fluorescence, maximum photochemical efficiency, chlorophyll index, anthocyanin index, and chlorophyll content measured by collecting photosynthetic characteristic indicators using a photosynthetic phenotypic imaging unit. Comprehensive evaluations of salt tolerance during the entire growth period of soybean were performed using correlation analysis, principal component analysis, fuzzy membership function analysis, and *D*-value comprehensive assessment methods. The results showed that under saline-alkali stress treatment, the 14 evaluation indicators of 48 soybean germplasm resources varied widely throughout the whole growth period, with the coefficient of variation ranging from 4.96% to 40.89%. Compared to the control treatment, the coefficient of variation of multiple measured indicators increased, and there were significant or highly significant correlations among the various indicators. Through principal component analysis, 14 individual indicators were transformed into three composite indicators, namely photosynthetic

收稿日期: 2025-02-21

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFD1201103)。

第一作者: 张东梅, 女, 硕士研究生, 主要从事大豆遗传育种与智慧育种。E-mail: 3101394256@qq.com。

通讯作者: 杨明亮, 男, 博士, 副教授, 主要从事大豆遗传育种与智慧育种研究。E-mail: mlyang@neau.edu.cn;

苗兴芬, 女, 博士, 副教授, 主要从事谷子育种及种子生理生化研究。E-mail: byndmxf@126.com。

indicators, morphological indicators, and yield indicators. Utilizing the *D*-value comprehensive evaluation method, four major categories were identified; among them, Gongye 03-5570 was classified as a highly saline-alkali tolerant material, while 14 materials including Century 1x13 were categorized as saline-alkali tolerant materials, 26 materials such as L65-540 were identified as intermediate materials, and 7 materials including Xiaobaiqi were classified as saline-alkali sensitive materials. No saline-alkali sensitive materials were identified.

**Keywords:** soybean; saline-alkali stress; saline-alkaline tolerant germplasm resources; high-throughput phenotypic identification; *D*-value comprehensive evaluation

大豆是重要的植物蛋白和脂肪的来源,经过长期的发展和推广逐渐在世界各地均有种植<sup>[1-2]</sup>。大豆由于其营养价值高及消费方式多样,广泛受到人民的喜爱。大豆籽粒常用于生产各种豆制品<sup>[3]</sup>,还可加工成食用油、精炼副产品(如人造肉、植物固醇、化妆品)及开发药品、保健品和化工品,秸秆常加工成饲料或燃料。因此大豆与人们的衣食住行密切相关,特别是在饮食结构中起着重要作用<sup>[2,4]</sup>。

据统计,目前我国盐碱地面积达  $9.15 \times 10^7$   $\text{hm}^2$ ,主要分布在东北、黄淮和西北等地区<sup>[5-6]</sup>,预计到2040年我国43%以上的耕地将受到盐碱化的影响<sup>[7-8]</sup>。在盐胁迫下,植物从土壤中获取水分变得十分困难,因生理干旱而受到伤害。而在植株体内因离子毒害、渗透效应和缺乏营养等因素受到影响<sup>[9]</sup>。由此可见,盐碱胁迫影响着作物的生长发育进程及产量形成<sup>[10]</sup>。此外,盐分也会对种子蛋白质、油分和碳水化合物的含量造成负面影响<sup>[11-12]</sup>。近年来我国大豆进口量持续攀升,2023年高达1.01亿t,对外依存度高达80%以上<sup>[13]</sup>,拓展大豆种植规模及提高大豆单产水平成为当前推动大豆产业发展的有效途径。而盐碱地的合理开发利用,对于提高我国粮食产量,满足粮食需求,促进农业可持续发展,有着十分现实的意义。种植耐盐碱大豆品种是有效利用盐碱地的途径之一,耐盐碱性较强的品种在一定程度上可提高大豆生产潜力<sup>[14]</sup>,因此筛选耐盐碱大豆种质资源,对于培育耐盐碱大豆新品种,合理开发利用盐渍土,缓解盐碱胁迫对植物的影响<sup>[15]</sup>及增加我国大豆种植面积具有重要意义。

大豆被归类为中等耐盐作物,当土壤电导率阈值超过  $5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$  时,盐胁迫会升高叶片温度,降低光合速率、生长率并改变叶色<sup>[16]</sup>。产量构成因素也会受到不同程度的影响,最终导致产量降低<sup>[17]</sup>,而造成大豆产量损失的原因可能是发芽率较低<sup>[18]</sup>及生长过程中发育不良<sup>[19-20]</sup>。国内外众多学者研究表明,对种质资源进行耐盐碱性鉴定与评价是大豆耐盐碱育种的基础<sup>[21]</sup>。季平等<sup>[12]</sup>研究发现,盐碱胁迫对大豆叶片的伤害远大于对茎的伤害,盐碱胁迫还可通过影响大豆单荚粒数而降低其产量。曹帅等<sup>[22]</sup>通过水培法对18份大豆种质资源进行耐盐碱性鉴定,得到了4份耐盐碱大豆种质,并利用主成

分分析法确定了株高、主根长及净光合速率为大豆耐盐碱鉴定的主要测定指标。学者在盐碱胁迫处理时期上,多集中在萌发期和苗期等,而进行全生育期耐盐碱性鉴定的研究相对较少,特别是在大规模种质资源耐盐碱表型鉴定中,传统的生长指标和光合指标检测耗时长、不稳定、标准无法统一且劳动强度大<sup>[23]</sup>。随着科学技术的发展,高通量表型分析平台逐渐成为获取高质量、标准化数据的有效途径之一,利用高通量表型平台鉴定作物耐盐碱性成为研究热点。

盐碱胁迫对大豆的影响伴随着大豆的整个生育期,当盐碱胁迫阈值超过大豆的耐受性时会显著抑制大豆生长。本研究以48份大豆种质资源为研究对象,在pH9.0处理下进行全生育期耐盐碱性表型鉴定。利用温室高通量表型平台采集苗期RGB图像及R6时期采集叶绿素荧光参数,并调查成苗率和成熟期产量性状。结合以上表型数据开展种质资源耐盐碱性评价,旨在为培育耐盐碱大豆新品种和挖掘耐盐碱基因提供材料基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

供试大豆材料共48份,由东北农业大学农学院大豆遗传改良团队提供,其中国外资源共10份,国内资源共38份,分别为18份农家种和20份栽培种(表1)。

### 1.2 耐盐碱性鉴定方法

试验于2023年6月6日在东北农业大学表型园区现代化智能温室中开展,采用盆栽法,盆栽规格为上直径25cm,下直径25cm,高20cm,底部含排水孔,内部铺设一层细纱网,在盆下垫有直径28cm的托盘。本研究所用田园土为过筛栽土,土壤有机质  $15.47 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,碱解氮  $99.44 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,有效磷  $33.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效钾  $169.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;所用盐碱土为黑龙江省安达市青肯泡乡苏打盐碱地的土壤。将苏打盐碱土(pH10.5)与田园土(pH7.5)按比例混合,用pH8.0的盐碱混合土为对照处理(CK),pH9.0的盐碱混合土为胁迫处理,每盆等量装土5kg,播种10粒种子,播种深度3cm,3次重复,每个品种种植3盆,温室内为自然光照,中午温度过高

时,及时通风降温,保证温室室内温度在 21 ~ 25 ℃ 之间,每盆浇水 1 L,保证土壤湿度 85% 左右,每 7 d 浇

水 1 次,炎热夏季 3 ~ 5 d 浇水 1 次。在 V1 期进行定苗,拔除小苗和弱苗,每盆保留 3 株长势一致的幼苗。

表 1 供试大豆种质资源编号、名称及类型

Table 1 The numbers, names, and types of tested soybean germplasm resources

序号 No.	名称 Name	类型 Type	序号 No.	名称 Name	类型 Type
1	L65-540	国外资源	25	小黄豆 Xiaohuangdou	农家种
2	Century lx13	国外资源	26	猫眼豆 Maoyandou	农家种
3	L73-79	国外资源	27	铁荚四粒黄 Tiejiasilihuang	农家种
4	HLT8	国外资源	28	压破车 Yapoche	农家种
5	T116H	国外资源	29	公野 03-5570 Gongye 03-5570	栽培种
6	Harosoy	国外资源	30	辽 0913 Liao 0913	栽培种
7	Hobbit87	国外资源	31	Z13-631-2	栽培种
8	16ZF309-1	国外资源	32	丰收 25 号 Fengshou 25	栽培种
9	NT04	国外资源	33	绥农 26 Suinong 26	栽培种
10	L85-144	国外资源	34	绥农 18 Suinong 18	栽培种
11	青豆 Qingdou	农家种	35	绥农 68 Suinong 68	栽培种
12	龙庆豆 2 Longqingdou 2	农家种	36	黑河 39 Heihe 39	栽培种
13	望奎莲花黑豆 Wangkuilianhuaheidou	农家种	37	哈 13-2413 Ha 13-2413	栽培种
14	吉林小粒豆 Jilinxiaolidou	农家种	38	哈 12-4547 Ha 12-4547	栽培种
15	小白豆 Xiaobaidou	农家种	39	黑河 24 Heihe 24	栽培种
16	小白脐 Xiaobaiqi	农家种	40	长农 17 Changnong 17	栽培种
17	大粒黄 Dalihuang	农家种	41	绥农 44 Suinong 44	栽培种
18	扶余嘟噜豆 Fuyuduludou	农家种	42	绥农 27 Suinong 27	栽培种
19	农安酱色豆 Nonganjiangsedou	农家种	43	黑河 50 号 Heihe 50	栽培种
20	永吉枣豆 Yongjizaodou	农家种	44	龙垦 332 Longken 332	栽培种
21	小粒秣食豆 Xiaolimoshidou	农家种	45	东农 57 Dongnong 57	栽培种
22	极早黄 Jizaohuang	农家种	46	克 732 Ke 732	栽培种
23	白城秣食豆 Baichengmoshidou	农家种	47	吉林 30 Jilin 30	栽培种
24	四粒黄 Silihuang	农家种	48	黑农 35 Heinong 35	栽培种

### 1.3 测定指标与方法

在苗期统计成苗率,并利用高通量表型平台的RGB单元采集苗期RGB图像数据,使用Image J(1.53a)软件提取RGB参数,获取外接矩形面积、外接圆面积、凸包面积和覆盖率等参数。在R6期,利用高通量表型平台的光合表型成像单元TriatPEFField采集光合特性指标参数,利用Data Analysis软件进行光合指标分析,获取荧光相关参数,包括最大光化学效率、最大荧光、初始荧光、叶绿素指数、叶绿素和花青素指数。收获后进行室内考种,参考《大豆种质资源描述规范和数据标准》<sup>[24]</sup>,计算单株产量、单株粒数、种子重量。

### 1.4 数据分析

利用SPSS 26.0和Excel 2003软件对测定的数据进行描述性统计;利用主成分分析、隶属函数分析和综合评价D值等方法对供试材料进行耐盐碱性鉴定和评价。

隶属函数计算公式:

$$U(X_{ij}) = (X_{ij} - X_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min})$$

$U$ 表示隶属函数值, $X_{ij}$ 表示第*i*个种质的第*j*个主成分值, $X_{j\max}$ 表示第*j*个主成分的最大值, $X_{j\min}$ 表示第*j*个主成分的最小值。

主成分权重计算公式:

$$w_j = P_j / \sum_{j=1}^n P_j, \quad j = 1, 2, \dots, n$$

$w_j$ 表示第*j*个主成分的重要程度, $P_j$ 表示第*j*个主成分的贡献率。

耐盐碱综合评价D值计算公式:

$$D = \sum_{j=1}^n [U(X_{ij}) \times W_j], \quad j = 1, 2, \dots, n$$

D值表示第*i*个大豆材料在盐碱胁迫条件下的耐盐碱性综合评价。

根据D值将种质材料划分为5个耐盐碱等级:  $0.80 \leq D$  值  $\leq 1.0$ , I级高耐盐碱;  $0.60 \leq D$  值, II级耐盐碱;  $0.40 \leq D$  值, III级中间型;  $0.20 \leq D$  值  $< 0.40$ , IV级不耐盐碱;  $0.00 \leq D$  值, V级盐碱敏感<sup>[23]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 盐碱胁迫条件下各指标的变异统计

参试的48份大豆材料的14个指标相对CK组和胁迫处理组的变异统计结果如表2所示。除SW和CA\_RGB外,所有指标在盐碱胁迫下的变异系数均高于CK组,尤其SR(从14.63%升至23.92%)和CR\_RGB(从14.89%升至24.37%)差异明显,

说明盐碱胁迫加剧了群体内性状的不稳定性。盐碱胁迫下,RA\_RGB、CA\_RGB、HA\_RGB的平均值均下降,如RA\_RGB从16.95降至15.71;变异幅度缩小,如HA\_RGB从9.06~15.55缩小至5.63~14.19;变异系数普遍上升,如HA\_RGB的变异系数从15.71%升至18.55%。表明盐碱胁迫抑制植株生长,且个体间形态差异增大。 $F_v/F_m$ 的均值降低至0.789,变异系数上升至4.96%,说明胁迫导致光合系统受损,且个体间稳定性下降。 $F_m$ 的平均值从4906降至3585(降幅27%),变异系数从17.81%升至24.06%,反映光合机构受胁迫影响明显。Ant-index的平均值从1.497降至1.113,变异系数略升,可能与植株抗氧化响应相关。

为了进一步分析盐碱胁迫下各指标的变化幅度和稳定性,更直观地体现基因型响应差异及全面解析盐碱胁迫效应,通过表3的相对比值分析结果可知:48份大豆种质资源的14个指标的变异系数在5.068%到27.717%之间。其中 $F_v/F_m$ 指标的变异系数最小为5.068%,极差为0.227,均值为0.938,表明胁迫下光合系统受损但个体间差异小,适合作为耐盐碱性核心指标。CR\_RGB指标的变异系数为26.87%,极差为1.108;Chi-index指标的变异系数为26.443%,极差为0.765。表明这些性状对盐碱胁迫响应差异大,适合作为筛选耐盐碱种质的候选指标。多数性状均值小于1,如RA\_RGB(0.945)、 $F_v/F_m$ (0.938)、Chi-index(0.699),表明盐碱胁迫导致这些性状显著低于对照组。而SW的均值为1.003, $F_0$ 的均值为0.954,说明种子重量和 $F_0$ 受胁迫影响较小,群体中可能存在潜在的优势耐盐碱基因型。相对耐盐碱指标SW最大值达1.389,在胁迫下种子重量高于对照。SYP和SNP指标的变异系数较大,说明产量性状对盐碱胁迫敏感且遗传多样性更高。

### 2.2 盐碱胁迫下大豆种质资源的指标变化分析

如图1A所示,14个指标在胁迫和CK处理中均达到显著性水平( $P < 0.05$ ),这说明14个指标在不同的处理条件下可稳定反映48份大豆种质资源的耐盐碱性差异,在筛选和鉴定耐盐碱品种及研究耐盐碱机理等方面具有重要的应用价值。14个指标在栽培种、农家种和国外资源等不同类型品种间的差异结果如图1B所示,RA\_RGB、CR\_RGB和 $F_0$ 指标在栽培种和农家种种质资源中差异呈显著性水平,而 $F_v/F_m$ 、Chi-index和Ant-index指标在农家种和国外资源种质间的差异呈显著性水平,其他8

个指标在 3 种类型品种间未达到显著性水平,说明指标在不同基因型的种质资源鉴定中存在差异。与对照相比,14 个相对指标的变化如图 1C 所示,除 SW 指标外,其他 13 个指标比率小于 1,SR、Chl-

index、 $F_m$ 、Ant-index 和 Chl 指标比率相对较低,表明这些指标受盐碱胁迫影响更大,能反映盐碱胁迫对大豆生长和发育的不利影响。

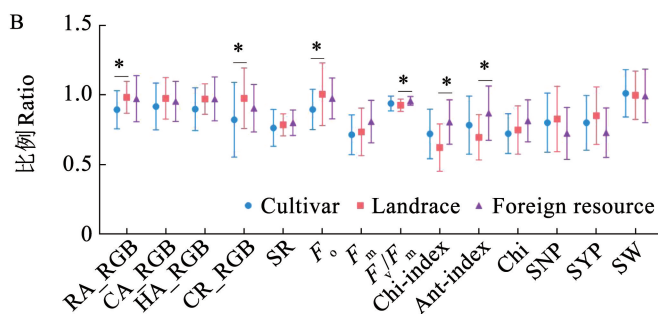
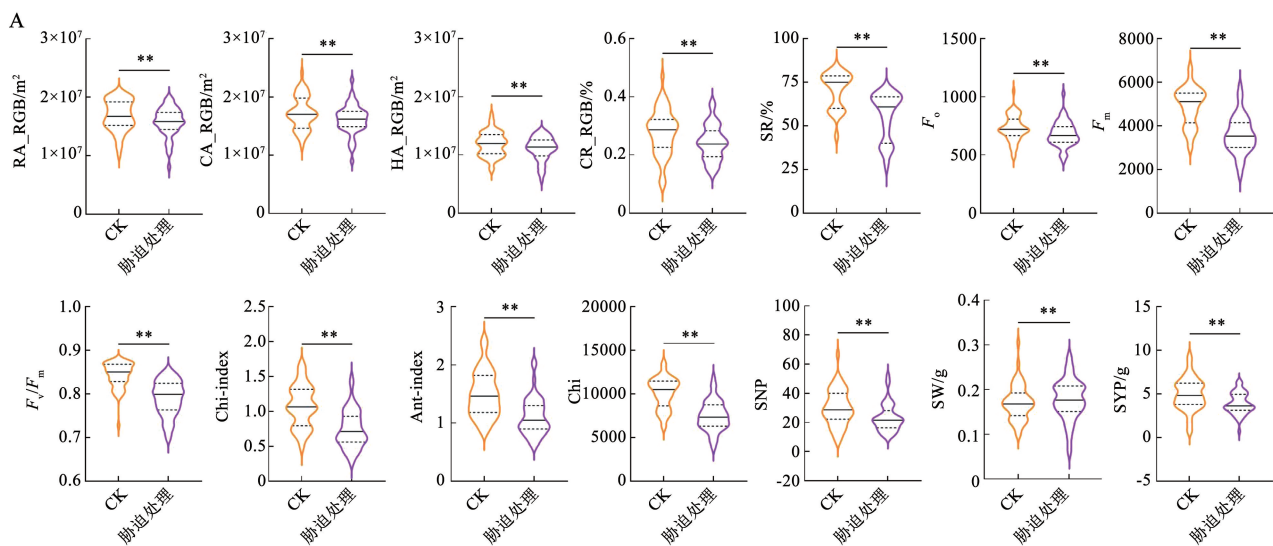
表 2 盐碱胁迫处理下大豆种质资源性状指标的变异统计

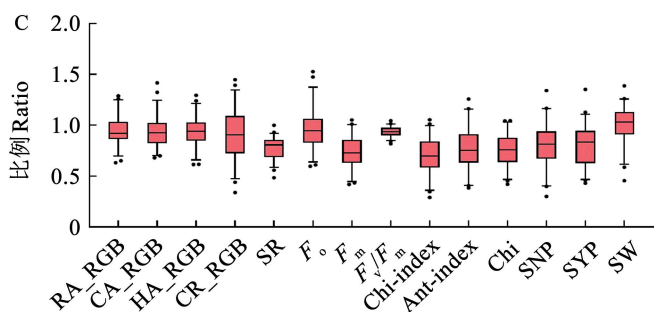
Table 2 Variation statistics of various trait indicators under control and saline alkali treatment

指标 Indicator	指标英文全称 Full name of indicators	CK				盐碱胁迫 pH9.0			
		变异幅度 Range	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV/%	变异幅度 Range	平均值 Mean	标准差 SD	变异系数 CV/%
外接矩形面积 Rectangle area / ( $\times 10^6$ m <sup>2</sup> )	RA_RGB	12.99 ~ 21.05	16.95	2.51	14.80	8.08 ~ 19.95	15.71	2.49	15.90
外接圆面积 Circle area / ( $\times 10^6$ m <sup>2</sup> )	CA_RGB	13.28 ~ 21.55	17.48	2.72	15.59	8.99 ~ 20.65	15.98	2.31	14.47
凸包面积 Hull are / ( $\times 10^6$ m <sup>2</sup> )	HA_RGB	9.06 ~ 15.55	11.98	1.88	15.71	5.63 ~ 14.19	11.08	2.05	18.55
覆盖率 Coverage rate / %	CR_RGB	0.202 ~ 0.401	0.313	0.047	14.89	0.136 ~ 0.378	0.243	0.059	24.37
初始荧光 Original fluorescence	$F_o$	483 ~ 1050	728	110	15.13	449 ~ 1026	680	107	15.77
最大荧光 Maximal fluorescence	$F_m$	2978 ~ 6722	4906	874	17.81	1712 ~ 5841	3585	863	24.06
最大光化学效率 Maximum quantum yield for primary photochemistry	$F_v/F_m$	0.728 ~ 0.877	0.842	0.029	3.46	0.698 ~ 0.851	0.789	0.039	4.96
叶绿素指数 Chlorophyll index	Chi-index	0.481 ~ 1.664	1.078	0.295	27.33	0.269 ~ 1.474	0.742	0.265	35.72
花青素指数 Anthocyanin index	Ant-index	0.865 ~ 2.416	1.497	0.386	25.78	0.618 ~ 2.040	1.113	0.319	28.64
叶绿素 Chlorophyll	Chl	6252 ~ 13516	10134	1771	17.48	3794 ~ 11895	7490	1708	22.81
成苗率 Seeding rate / %	SR	43.33 ~ 85.00	70.50	10.30	14.63	26.67 ~ 71.67	55.60	13.30	23.92
单株粒数 Seeds number per plant	SNP	7.0 ~ 66.5	30.16	12.18	40.39	9.5 ~ 52.5	23.3	9.53	40.89
种子重量 Seeds weight / g	SW	0.100 ~ 0.305	0.171	0.039	22.96	0.059 ~ 0.276	0.178	0.045	25.43
单株产量 Seeds yield per plant / g	SYP	0.731 ~ 9.423	4.974	1.831	36.81	0.715 ~ 6.366	3.899	1.202	30.82

表3 盐碱胁迫处理值大豆种质资源各指标与对照组比值的变异统计分析  
 Table 3 Statistical analysis of the ratio of various indicators under saline-alkali stress and control of soybean germplasm resources

性状 Trait	最大值 Maximum	最小值 Minimum	极差 Range	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 CV/%
RA_RGB	1.290	0.632	0.658	0.945	0.141	14.963
CA_RGB	1.418	0.682	0.736	0.948	0.159	16.722
HA_RGB	1.295	0.615	0.680	0.942	0.144	15.262
CR_RGB	1.448	0.340	1.108	0.900	0.242	26.870
SR	1.000	0.486	0.514	0.779	0.107	13.701
$F_0$	1.529	0.597	0.932	0.954	0.187	19.637
$F_m$	1.053	0.419	0.634	0.741	0.160	21.651
$F_v/F_m$	1.045	0.819	0.227	0.938	0.048	5.068
Chi-index	1.056	0.291	0.765	0.699	0.185	26.443
Ant-index	1.259	0.384	0.874	0.767	0.200	26.081
Chi	1.045	0.422	0.623	0.751	0.161	21.441
SNP	1.343	0.301	1.042	0.796	0.221	27.717
SYP	1.353	0.431	0.922	0.806	0.202	25.109
SW	1.389	0.456	0.932	1.003	0.177	17.602





注: \*\* 表示差异显著 ( $P < 0.01$ ); A. 14 个指标相对对照处理的差异; B. 各相对指标在不同品种类型间的差异; C. 14 个相对指标的变化。

Note: \*\* indicating significant difference ( $P < 0.01$ ); A. Differences in 14 indicators compared to the control treatment; B. The differences in relative indicators between different varieties and types; C. Changes in 14 relative indicators.

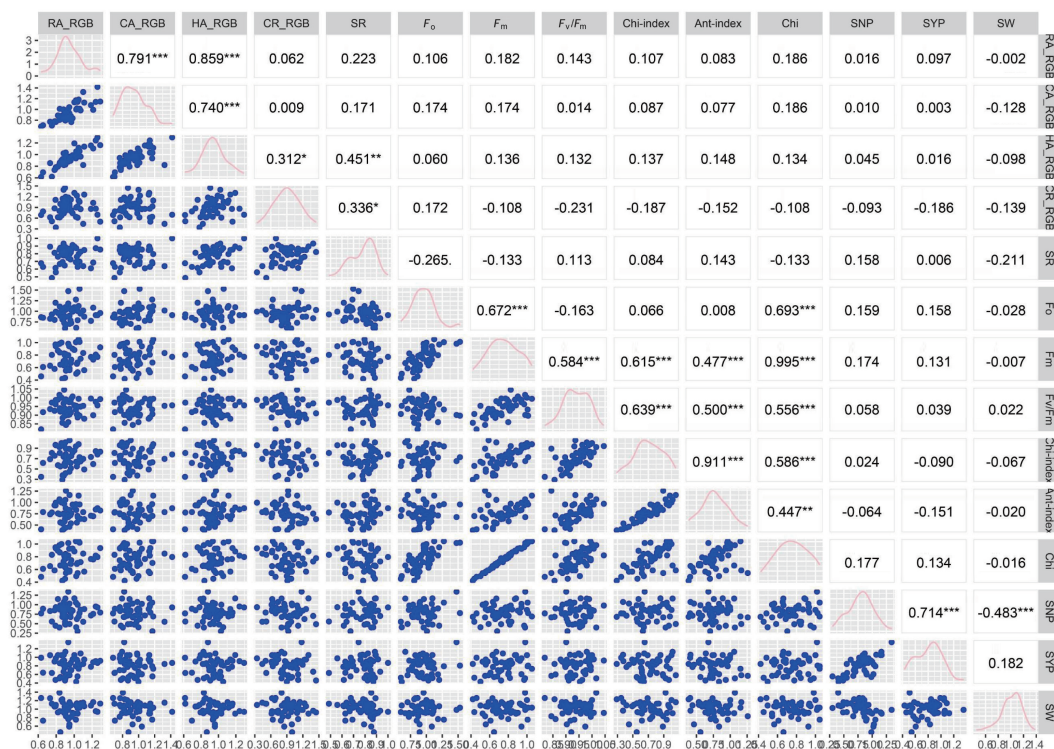
图 1 盐碱胁迫下各指标的变化

Fig. 1 Changes of each index under saline-alkali stress

### 2.3 各指标相关性分析

对全生育期的 14 个指标进行相关性分析的结果如图 2 所示。多个指标的相关性达到了显著水平 ( $P < 0.01$ ) 或极显著水平 ( $P < 0.001$ ), 其中 SW 与 SNP 呈极显著负相关, 相关系数为  $-0.483$ ; SYP 与 SNP 呈极显著正相关, 相关系数为  $0.714$ ; Chi 与  $F_o$ 、 $F_m$ 、 $F_v/F_m$  和 Chi-index 呈极显著正相关, 相关系数分别为  $0.693$ ,  $0.995$ ,  $0.556$  和  $0.586$ 。与 Ant-index 呈显著正相关, 相关系数为  $0.447$ ; Ant-index 与  $F_m$ 、 $F_v/F_m$  和 Chi-index 呈极显著正相关, 相关系数分别为  $0.477$ ,  $0.500$  和  $0.911$ ; Chi-index 与  $F_m$ 、 $F_v/F_m$  呈

极显著正相关, 相关性分别为  $0.615$  和  $0.639$ ;  $F_v/F_m$  与  $F_m$  呈极显著正相关, 相关系数为  $0.584$ ;  $F_o$  和  $F_m$  呈极显著正相关, 相关系数为  $0.672$ ; SR 与 HA-rgb 呈显著正相关, 相关性为  $0.451$ ; HA-rgb 与 RA-rgb 和 CA-rgb 呈极显著正相关, 相关系数分别为  $0.859$  和  $0.740$ 。RA-rgb 和 CA-rgb 呈极显著正相关, 相关系数为  $0.791$ 。各个指标的相关性体现了这些指标间的内在联系, Chl 和  $F_m$  相关性最高 ( $r = 0.995$ ), 其次是 Ant-index 和 Chi-index。说明盐碱胁迫下大豆的光合作用受到显著影响, 与叶绿素指数、最大荧光及花青素指数等光合指标相关。



注: \* 表示显著相关 ( $P < 0.01$ ), \*\* 表示极显著相关 ( $P < 0.001$ )

Note: \* indicates significant correlation ( $P < 0.01$ ), while \*\* indicates highly significant correlation ( $P < 0.001$ ).

图 2 盐碱胁迫下各指标的相关性分析

Fig. 2 Correlation analysis of each index under saline-alkali stress

## 2.4 各指标主成分分析

依据各指标在 48 份种质资源中的评价结果及相关性分析研究结果可知,部分指标之间呈极显著或显著相关性,在指标评价上存在冗余功能。因此,通过主成分分析对各指标进行多指标降维处理,提取到特征值大于 1 的主成分共 3 个,F1 的特征值为 4.018,F2 的特征值为 2.669,F3 的特征值为 2.043,其贡献率依次为 28.7%、19.06% 和 14.59%,累计贡献率达到 62.36%,可以代表 14 个单一指标的大部分信息。各主成分的特征值、原始性状载荷及贡献率如表 4 所示。通过主成分分析将 14 个反映耐盐碱能力的指标转化为 3 个独立的综合指标,用于综合评价全生育期大豆的耐盐碱能力。在对应的特征向量主成分 F1 中,系数较大的指标为  $F_m$ 、Chi、Chi-index、Ant-index 和  $F_v/F_m$ ,相关系数分别为 0.886、0.876、0.783、0.672 和 0.660,主要反映了大豆地上部的光合指标状况。在主成分 F2 中,系数较大的指标为 HA\_RGB、RA\_RGB、CA\_RGB,相关系数分别为 0.803、0.715 和 0.687,主要反映了地上部的形态指标状况。在主成分 F3 中,相关系数较大的  $F_o$ 、SNP 和 SYP,相关系数分别为 0.668、0.624 和 0.659,主要反映了与产量相关的农艺指标状况。

## 2.5 大豆种质资源全生育期耐盐碱性综合评价

根据 48 份大豆种质资源全生育期指标的主成分值,计算 3 个综合指标的隶属函数值并对综合指标进行归一化处理,计算各主成分的权重值分别为 46%、30.6% 和 23.4%。进一步计算各大豆种质资源全生育期耐盐碱性的  $D$  值,依据  $D$  值对大豆种质资源的耐盐碱能力进行综合评价,结果如表 5 所示,供试大豆种质资源的  $D$  值介于 0.278 ~ 0.800 之

间,鉴定到高耐盐碱材料 1 份,耐盐碱材料 14 份,中间型材料 26 份,不耐盐碱材料 7 份,未鉴定到盐碱敏感材料。

表 4 各指标主成分特征值及特征向量分析  
Table 4 Analysis of eigenvalues and eigenvectors of principal components for soybean indicators

性状 Trait	主成分因子 Comprehensive factors		
	F1	F2	F3
RA_RGB	0.495	-0.715	0.057
CA_RGB	0.464	-0.687	0.013
HA_RGB	0.478	-0.803	0.169
CR_RGB	-0.103	-0.398	0.025
SR	0.099	-0.552	0.376
$F_o$	0.445	0.080	-0.668
$F_m$	0.886	0.288	-0.250
$F_v/F_m$	0.660	0.254	0.345
Chi-index	0.783	0.340	0.350
Ant-index	0.672	0.288	0.462
Chi	0.876	0.274	-0.275
SNP	0.194	-0.248	-0.624
SYP	0.113	-0.137	-0.659
SW	-0.089	0.265	0.071
特征值 Eigen value	4.018	2.669	2.043
贡献率 Contribution rate/%	28.70	19.06	14.59
累计贡献率 Accumulative contribution rate/%	28.70	47.76	62.36
权重 Weight/%	0.46	0.306	0.234

表 5 大豆种质的主成分值、隶属函数与综合评价  $D$  值

Table 5 Principal component values, membership functions, and comprehensive evaluation  $D$ -value of soybean germplasm

名称 Name	耐盐碱性综合评价 Comprehensive evaluation of saline-alkali tolerance								
	主成分 Principal component			隶属函数 Membership function			$D$ 值 $D$ -value	耐性排序 Tolerance ranking	耐性等级 Tolerance grade
	PC1	PC2	PC3	R1	R2	R3			
L65-540	0.091	0.298	0.693	0.575	0.501	0.660	0.572	20	III
Century lx13	3.007	-1.346	0.308	0.892	0.298	0.614	0.645	11	II
L73-79	2.360	-2.408	0.416	0.822	0.167	0.627	0.576	19	III
HLT8	-1.593	1.301	0.534	0.392	0.625	0.641	0.521	27	III
T116H	-1.586	-0.782	-0.058	0.393	0.368	0.569	0.426	37	III
Harosoy	-0.110	0.730	3.280	0.553	0.554	0.974	0.652	10	II
Hobbit87	1.152	3.269	0.554	0.690	0.868	0.643	0.734	3	II
16ZF309-1	-0.423	0.598	-0.875	0.519	0.538	0.470	0.513	29	III
NT04	4.000	-0.165	0.772	1.000	0.444	0.670	0.753	2	II

表 5(续)

名称 Name	耐盐碱性综合评价 Comprehensive evaluation of saline-alkali tolerance							D 值 D-value	耐性排序 Tolerance ranking	耐性等级 Tolerance grade
	主成分 Principal component			隶属函数 Membership function						
	PC1	PC2	PC3	R1	R2	R3				
L85-144	2.052	0.451	0.197	0.788	0.520	0.600	0.662	9	II	
青豆 Qingdou	1.482	0.772	0.951	0.726	0.560	0.692	0.667	7	II	
龙庆豆 2 Longqingdou 2	2.178	-0.150	-0.158	0.802	0.446	0.557	0.636	12	II	
望奎莲花黑豆 Wangkuilianhuaheidou	3.182	0.397	-1.629	0.911	0.513	0.379	0.665	8	II	
吉林小粒豆 Jilinxiaolidou	-2.146	-1.691	-1.016	0.332	0.255	0.453	0.337	46	IV	
小白豆 Xiaobaidou	2.526	-0.029	-1.907	0.840	0.461	0.345	0.608	13	II	
小白脐 Xiaobaiqi	-1.267	-3.210	-0.271	0.427	0.068	0.543	0.344	45	IV	
大粒黄 Dalihuang	-2.844	-1.145	2.466	0.256	0.323	0.875	0.421	38	III	
扶余嘟噜豆 Fuyuduludou	0.183	-1.456	-0.830	0.585	0.284	0.476	0.467	36	III	
农安酱色豆 Nonganjiangsedou	-1.275	-0.827	-0.759	0.426	0.362	0.484	0.420	39	III	
永吉枣豆 Yongjizaodou	-1.124	-0.202	0.810	0.443	0.439	0.674	0.496	31	III	
小粒秣食豆 Xiaolimoshidou	1.422	0.166	-4.754	0.720	0.485	0.000	0.479	35	III	
极早黄 Jizaohuang	-2.158	-0.277	-1.438	0.330	0.430	0.402	0.378	43	IV	
白城秣食豆 Baichengmoshidou	-4.520	-0.603	-0.359	0.073	0.390	0.533	0.278	48	IV	
四粒黄 Silihuang	-1.033	-1.280	-0.660	0.453	0.306	0.496	0.418	40	III	
小黄豆 Xiaohuangdou	0.017	-0.872	-0.768	0.567	0.356	0.483	0.483	34	III	
猫眼豆 Maoyandou	2.591	-3.757	0.839	0.847	0.000	0.678	0.548	24	III	
铁荚四粒黄 Tiejiasilihuang	2.501	2.089	-0.301	0.837	0.722	0.540	0.732	4	II	
压破车 Yapoche	-0.885	0.749	0.868	0.469	0.557	0.681	0.545	25	III	
公野 03-5570 Gongye 03-5570	1.780	2.919	2.252	0.759	0.825	0.849	0.800	1	I	
辽 0913 Liao 0913	1.159	0.393	-0.221	0.691	0.513	0.549	0.603	14	II	
Z13-631-2	1.554	3.640	-1.005	0.734	0.914	0.454	0.724	5	II	
丰收 25 号 Fengshou 25	-0.115	-1.072	1.467	0.553	0.332	0.754	0.532	26	III	
绥农 26 Suinong 26	0.739	-0.257	0.748	0.645	0.432	0.667	0.585	17	III	
绥农 18 Suinong 18	0.459	0.676	0.534	0.615	0.548	0.641	0.600	15	II	
绥农 68 Suinong 68	0.080	-0.881	-0.757	0.574	0.355	0.484	0.486	33	III	
黑河 39 Heihe 39	-2.270	-0.490	-0.677	0.318	0.404	0.494	0.386	42	IV	
哈 13-2413 Ha 13-2413	-5.196	1.779	-1.715	0.000	0.684	0.368	0.295	47	IV	
哈 12-4547 Ha 12-4547	-2.046	-0.639	-2.033	0.343	0.385	0.330	0.353	44	IV	
黑河 24 Heihe 24	-0.735	-0.321	2.171	0.485	0.424	0.839	0.549	23	III	
长农 17 Changnong 17	0.739	1.273	-1.232	0.645	0.621	0.427	0.587	16	III	
绥农 44 Suinong 44	-1.534	-1.094	3.496	0.398	0.329	1.000	0.518	28	III	
绥农 27 Suinong 27	-2.407	2.225	-0.205	0.303	0.739	0.551	0.495	32	III	
黑河 50 号 Heihe 50	-0.026	0.245	1.106	0.562	0.494	0.710	0.576	18	III	
龙垦 332 Longken 332	-1.302	-1.454	-0.586	0.424	0.285	0.505	0.400	41	III	
东农 57 Dongnong 57	-1.478	1.134	0.004	0.404	0.604	0.577	0.506	30	III	
克 732 Ke 732	2.484	-2.093	-1.013	0.835	0.206	0.453	0.553	22	III	
吉林 30 Jilin 30	-0.697	4.338	0.068	0.489	1.000	0.585	0.668	6	II	
黑农 35 Heinong 35	1.028	-0.944	0.693	0.677	0.348	0.660	0.572	21	III	

### 3 讨论

在盐碱胁迫条件下,48份大豆种质资源各指标均值除SNP外均不同程度下降,说明盐碱胁迫浓度的升高,对各指标产生负向效应,对相关性状的抑制程度增加。前人利用农艺指标、生理指标及光合指标进行了大量研究<sup>[25-31]</sup>。张笛等<sup>[32]</sup>采用盆栽法对不同品种大豆资源进行耐盐碱性挖掘和鉴定,在胁迫条件下,株高、底荚高度、主茎节数、有效分枝数、有效荚数、无效荚数、单株粒重和百粒重均与对照相比有不同程度的减少,与本研究结果一致;大豆种质的耐盐碱性是一个复杂的多基因控制的性状,采用单一性状与多性状综合评价筛选结果存在差异。主成分分析是通过将多个指标转化为较少的且独立的新综合指标<sup>[33]</sup>,本研究利用主成分分析将14个指标转化为3类综合指标,分别为光合指标、形态指标和产量指标,通过这些因子可对大豆进行耐盐碱性评价。通过对比分析各指标在对照和pH9.0盐碱胁迫处理下的变化趋势可知,14个指标在对照和pH9.0处理水平上均达到显著差异;在不同类型的种质资源中,14个指标在栽培种和农家种品种类型间仅RA\_RGB、CR\_RGB和 $F_0$ 等3个指标呈显著性水平, $F_0/F_m$ 、Chi-index和Ant-index在农家种和国外资源中呈显著水平,而其他8个指标在3种类型的种质资源中未达到显著性。说明指标在不同基因型的种质资源鉴定中存在差异;除SW相对指标外,其他13个相对指标比率小于1,表明这些指标受盐碱胁迫影响大,因此使用不同的指标评价不同的种质资源,获得的不同类型种质资源间的评价结果也有一定差异,与徐宗昌等<sup>[34]</sup>的研究发现一致。

前人已做了很多的大豆耐盐碱资源的筛选工作基础性研究,也筛选到很多耐盐碱大豆资源。目前耐盐碱鉴定方法主要分为室内鉴定和室外大田鉴定。现阶段大部分研究选择单一盐碱溶液或者混合溶液进行室内鉴定,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、气候等因素的影响。因此利用原位盐碱土模拟鉴定更加准确可靠。如韩德志等<sup>[35]</sup>利用大庆地区原位盐碱土,通过科学混土建立的大豆耐盐碱表型鉴定池用于种质资源筛选评价及耐盐碱品种的选育,研究结果

表明该方法是可行的。林海波<sup>[36]</sup>选择在盐碱地块和对照常规地块分别种植50个大豆品种,对其形态性状和产量进行耐盐性鉴定,筛选出4个耐盐碱性材料,占供试品种的8.0%。任静<sup>[37]</sup>以受盐碱胁迫的黄河三角洲试验地为胁迫处理和正常试验地为对照处理,对24个花生品种的成苗率、植物学性状、农艺学性状、相关产量指标和品质性状进行比较,通过主成分分析、隶属函数D值等综合评价方式得到8份耐盐碱高产品种。植物在不同生长发育阶段表现出不同程度的耐盐碱性,且不同阶段的耐盐碱性没有明显相关性。植物的萌发期和幼苗期耐盐碱抗性最弱,其次是生殖生长阶段,其他生长发育时期对盐碱胁迫的敏感性相对较低。因此,本研究选用原位土与田园土按比例混合进行大豆种质资源全生育期耐盐碱性评价,筛选出高耐盐碱材料公野03-5570和耐盐碱材料Century 1x13、Harosoy、Hobbit87和NT04等15个品种,在整个生育期表现出良好耐盐碱抗性,为大豆耐盐碱性新品种选育提供新的基因型资源。

### 4 结论

本研究采用pH9.0盐碱胁迫对48份大豆种质资源进行全生育期耐盐碱性鉴定,筛选出1份高耐盐碱材料公野03-5570,14份耐盐碱材料Century 1x13、Harosoy、Hobbit87、NT04、L85-144、青豆、龙庆豆2、望奎莲花黑豆、小白豆、铁荚四粒黄、辽0913、Z13-631-2、绥农18和吉林30,26份中间型材料L65-540、L73-79、HLT8、T116H、16ZF309-1、大粒黄、扶余嘟噜豆、农安酱色豆、永吉枣豆、小粒秣食豆、四粒黄、小黄豆、猫眼豆、压破车、丰收25号、绥农26、绥农68、黑河24、长农17、绥农44、绥农27、黑河50号、龙垦332、东农57、克732和黑农35,7份不耐盐碱材料分别是吉林小粒豆、小白脐、极早黄、白城秣食豆、黑河39、哈13-2413和哈12-4547,未鉴定到盐碱敏感材料。同时,通过主成分分析筛选到与RGB图像相关的4个指标CR\_RGB、RA\_RGB、CA\_RGB和HA\_RGB,可作为耐盐碱筛选的辅助指标,适合在高通量初筛和表型组学研究中应用,且与传统光合指标相结合可提高可靠性。本研究筛选出的全生育期耐盐碱性大豆种质资源可为培育耐盐碱大豆新品种及挖掘耐盐碱基因、解析耐盐碱机制等研究提供基础材料。

## 参考文献

- [1] 罗庆云, 於丙军, 刘友良. 大豆苗期耐盐性鉴定指标的检验[J]. 大豆科学, 2001, 20(3): 177-182.  
LUO Q Y, YU B J, LIU Y L. Effect of NaCl on the growth,  $K^+$ ,  $Na^+$  and  $Cl^-$  distribution in seedlings of 6 soybean cultivars (*Glycine max* L.) [J]. Soybean Science, 2001, 20(3): 177-182.
- [2] 李兆南, 孙石. 大豆耐盐性鉴定研究进展[J]. 现代农业科技, 2011(8): 12-13.  
LI Z N, SUN S. Research advances on salt tolerance identification of soybean [J]. Modern Agricultural Sciences and Technology, 2011(8): 12-13.
- [3] MA Y, LEE S H, GUK M, et al. Enhancing soy yogurt texture and functionality with mealworm protein [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 141: 107337.
- [4] 于晴. 中俄大豆国际贸易潜力研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020.  
YU Q. Study on international trade potential of soybean between China and Russia[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020.
- [5] 王佳丽, 黄贤金, 钟太洋, 等. 盐碱地可持续利用研究综述[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 673-684.  
WANG J L, HUANG X J, ZHONG T Y, et al. Review on sustainable utilization of salt-affected land [J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(5): 673-684.
- [6] 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. Saline soil and the comprehensive utilization of resources progress in China [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2008, 14(8): 19-22.
- [7] 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.
- [8] 刘淼, 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.
- [9] 顾晓, 杨文丽, 吴远燕, 等. 植物对盐胁迫的适应机制及其提高耐盐能力的主要途径[J]. 农技服务, 2021, 38(7): 92-96.  
GU X, YANG W L, WU Y Y, et al. The adaptive mechanism of plants to salt stress and the main ways to improve salt tolerance [J]. Agricultural Technology Service, 2021, 38(7): 92-96.
- [10] 王佳珍, 刘倩, 高妮妮, 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.
- [11] RABIE R K, KUMAZAWA K. Effect of salt stress on nitrogen nutrition and yield quality of nodulated soybeans [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 1988, 34(3): 385-391.
- [12] 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.
- [13] 曹彦蕾. 我国大豆产业发展和育种研究现状启示[J]. 黑龙江农业科学, 2025(1): 86-93.  
CAO Y L. Inspiration from the development and breeding research status of China's soybean industry [J]. Heilongjiang Agricultural Science, 2025(1): 86-93.
- [14] FLINT-GARCIA S A, THORNSBERRY J M, BUCKLERIV E S. Structure of linkage disequilibrium in plants [J]. Annual Review of Plant Biology, 2003, 54: 357-374.
- [15] 张春兰, 曹帅, 满丽莉, 等. 不同基因型大豆耐盐性筛选与综合鉴定[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2019, 34(4): 342-349.  
ZHANG C L, CAO S, MAN L L, et al. Screening and comprehensive identification of salt tolerance of soybean genotypes [J]. Journal of Inner Mongolia University for Nationalities (Natural Sciences), 2019, 34(4): 342-349.
- [16] EQUIZA M A, CALVO-POLANCO M, CIRELLI D, et al. Long-term impact of road salt (NaCl) on soil and urban trees in Edmonton, Canada [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2017, 21: 16-28.
- [17] 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.
- [18] BLANCO F F, FOLEGATTI M V, GHEYI H, et al. Emergence and growth of corn and soybean under saline stress [J]. Scientia Agricola, 2007, 64(5): 451-459.
- [19] EL-SABAGH A, SOROUR S, UEDA A, et al. Evaluation of salinity stress effects on seed yield and quality of three soybean cultivars [J]. Azarian Journal of Agriculture, 2015, 2(5): 138-141.
- [20] ABEL G H. Inheritance of the capacity for chloride inclusion and chloride exclusion by soybeans [J]. Crop Science, 1969, 9(6): 697-698.
- [21] GONG B, WEN D, VANDENLANGENBERG K, et al. Comparative effects of NaCl and  $NaHCO_3$  stress on photosynthetic parameters, nutrient metabolism, and the antioxidant system in tomato leaves [J]. Scientia Horticulturae, 2013, 157: 1-12.
- [22] 曹帅, 杜仲阳, 向殿军, 等. 18 份大豆品种耐盐碱性筛选与综

- 合鉴定[J]. 大豆科学, 2019, 38(3): 344-352.
- CAO S, DU Z Y, XIANG D J, et al. Salt and alkaline tolerance screening and comprehensive identification of eighteen soybean varieties[J]. Soybean Science, 2019, 38(3): 344-352.
- [23] 束宏伟, 王玉伟, 饶元, 等. 融合三维结构光和叶绿素荧光的植株光合表型成像系统[J]. 智慧农业, 2024, 6(1): 63-75.
- SHU H W, WANG Y W, RAO Y, et al. Plant photosynthetic phenotype imaging system integrating three-dimensional structured light and chlorophyll fluorescence [J]. Smart Agriculture, 2024, 6(1): 63-75.
- [24] 邱丽娟, 常汝镇. 大豆种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京: 中国农业出版社, 2006.
- QIU L J, CHANG R Z. Descriptors and data standard for melon (*Glycine* spp.) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006.
- [25] 石运庆, 苗华荣, 胡晓辉, 等. 花生耐盐碱性鉴定指标的研究及应用[J]. 核农学报, 2015, 29(3): 442-447.
- SHI Y Q, MIAO H R, HU X H, et al. Research and application of saline-alkaline tolerance indexes of peanut [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2015, 29(3): 442-447.
- [26] 伏晓昭, 余奎军, 程晋龙, 等. 玉米杂交种耐盐碱性的主成分分析及综合评价[J]. 甘肃农业大学学报, 2024, 59(1): 65-73.
- FU X Z, SHE K J, CHENG J L, et al. Principal component analysis and comprehensive evaluation of salt and alkaline tolerance in maize hybrids [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2024, 59(1): 65-73.
- [27] 刘艺平, 张一琪, 苏少文, 等. 不同品种荷花耐盐碱性评价及鉴定指标筛选[J]. 浙江农业学报, 2023, 35(1): 103-111.
- LIU Y P, ZHANG Y Q, SU S W, et al. Evaluation of salt-alkali tolerance of different Lotus varieties and screening of identification indexes [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2023, 35(1): 103-111.
- [28] 周根友, 汪娟, 赵祥强. 大田评价水稻耐盐碱性的农艺性状指标研究[J]. 华北农学报, 2017, 32(S1): 102-107.
- ZHOU G Y, WANG J, ZHAO X Q. Study on agronomic traits indexes for evaluating salt and alkalinity tolerance of rice in field [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2017, 32(S1): 102-107.
- [29] 张环宇, 李焯. 盐碱胁迫下两个茄子品种生理指标和耐盐碱性研究[J]. 黑龙江农业科学, 2015(3): 37-40.
- ZHANG H Y, LI Y. Study on physiological and biochemical responses to salt and alkali stress in two varieties of eggplant [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2015(3): 37-40.
- [30] 黄雅婕, 任丹, 李生梅, 等. 陆地棉苗期的耐盐碱性评价及鉴定指标筛选[J]. 中国农业科技导报, 2022, 24(5): 46-55.
- HUANG Y J, REN D, LI S M, et al. Evaluation and screening of salt and alkali tolerance indices of upland cotton seedlings [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2022, 24(5): 46-55.
- [31] 于崧, 梁海芸, 郭潇潇, 等. 不同基因型绿豆苗期耐盐碱性分析及其鉴定指标的筛选[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(4): 223-232.
- YU S, LIANG H Y, GUO X X, et al. Analysis of saline-alkaline tolerance and determination of saline-alkaline tolerance evaluation indicators in seedling stage of different mung bean genotypes [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(4): 223-232.
- [32] 张笛, 袁明, 韩冬伟, 等. 松嫩平原耐盐碱大豆品种筛选与利用[J]. 黑龙江农业科学, 2024(4): 25-30.
- ZHANG D, YUAN M, HAN D W, et al. Selection and utilization of saline-tolerant soybean varieties in Songnen Plain [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2024(4): 25-30.
- [33] 张新草, 薛项潇, 姜深, 等. 大豆种质发芽期耐盐碱性鉴定及指标筛选[J]. 西北农业学报, 2020, 29(3): 374-381.
- ZHANG X C, XUE X X, JIANG S, et al. Identification of mixed saline-alkali tolerance and screening of indicators in soybean at germination stage [J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2020, 29(3): 374-381.
- [34] 徐宗昌, 鲁雪莉, 姜奇彦, 等. 50份黄淮产区大豆种质资源苗期耐盐性评价 [J/OL]. 中国油料作物学报, 1-10 [2024-12-29].
- XU Z C, LU X L, JIANG Q Y, et al. Evaluation of salt tolerance of 50 soybean germplasm resources in the Huang Huai production area during the seedling stage [J/OL]. Chinese Journal of Oil Crops, 1-10 [2024-12-29].
- [35] 韩德志, 孙浩峰, 冯丽艳, 等. 大豆耐盐碱鉴定池 pH 调节的初步研究[J]. 黑龙江农业科学, 2023(6): 1-5.
- HAN D Z, SUN H F, FENG L Y, et al. Preliminary study on pH adjustment of soybean salt and alkali tolerance identification pool [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2023(6): 1-5.
- [36] 林海波. 大豆品种耐盐碱鉴定与筛选研究[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(16): 22-25.
- LIN H B. Identification and screening of salt and alkali tolerance of soybean varieties [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2023, 51(16): 22-25.
- [37] 任静. 花生品种全生育期耐盐碱性鉴定及主要品质评价[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023.
- REN J. Identification of salt and alkaline tolerance and main quality evaluation of peanut varieties throughout the growth period [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023.