

棉花耐盐性鉴定方法探讨

苏莹 郭安慧 华金平*

(中国农业大学 农学院/作物遗传改良北京市重点实验室/杂种优势利用教育部重点实验室,北京 100193)

摘要 为明确快捷简便、经济有效和稳定可靠的棉花耐盐鉴定方法,收集整理1990—2021年国内外关于棉花耐盐性鉴定的相关文献报道,比较了棉花发育不同时期耐盐性鉴定方法,通过比较、综合已有研究结果提出,室内条件下棉花种子萌发期,采用滤纸发芽法以150 mmol/L NaCl溶液胁迫,调查种子发芽率指标,可作为棉花耐盐性快速鉴定的首选方法;室外条件下棉花苗期耐盐性鉴定推荐土壤含盐量0.40%的盐池处理棉花三叶期苗期,以成活苗率作为筛选标准。

关键词 棉花;耐盐性;萌发期;幼苗期;鉴定方法

中图分类号 S562

文章编号 1007-4333(2021)12-0011-09

文献标志码 A

Strategies for evaluation the salt tolerance in cotton

SU Ying, GUO Anhui, HUA Jinping*

(College of Agriculture and Biotechnology/Beijing Key Laboratory of Crop Genetic Improvement/Key Laboratory of Crop Heterosis and Utilization of Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract To establish a unified evaluation method, which is prerequisite for salt tolerance mechanism research, reports on the evaluation strategies in cotton salt tolerance since 1990 were summarized. Meanwhile, the evaluation protocols and corresponding results related to cotton salt tolerance during seed germination, seedling stage and whole growth stages were analyzed. The results showed that the unified evaluation protocols of salt-tolerance in upland cotton are: Under laboratory conditions, the cotton seeds germinating ratio is conducted by using the folding filter paper and keeping it wet at room temperature after treatment with 150 mmol/L NaCl solution at seed germination stage; Under outdoor conditions, the cotton seedlings survival ratio was determined after treatment with 0.40% NaCl in salt pool at three leaves seedling stage.

Keywords cotton; salt tolerance; germination stage; seedling stage; evaluation protocol

土壤盐渍化是干旱和半干旱地区限制作物产量关键的环境因素之一。土壤饱和浸提液电导率 ≥ 0.40 S/m的土壤定义为盐渍土,相当于40 mmol/L NaCl溶液^[1]。棉花中等耐盐(耐盐阈值为0.77 S/m),是盐碱地的先锋作物。耕地面积减少、我国棉花生产逐渐向盐碱地集中,选用耐盐品种、提高盐碱地棉花产量潜力和稳产性是优先的技术措施之一,因此生产上对于耐盐品种的需求日益紧迫。

棉花耐盐性受基因型影响较大,棉属中不同棉

种之间、陆地棉不同品种之间的耐盐性表现出显著差异^[2-3]。耐盐鉴定方法一般分为直接鉴定法和间接鉴定法(表1)^[4]。其中,直接鉴定法包括胁迫发芽法、形态观察法和产量比较法;间接鉴定法是应用植物生理学、生物化学和细胞学等手段研究盐胁迫应答过程的相关因子的变化,以一个或多个因子为指标来衡量耐盐性。棉花耐盐分子标记的开发和应用,也是间接鉴定法^[5-7]。种子萌发期和幼苗期是棉花对盐胁迫最为敏感的时期。种子萌发期主要采用

收稿日期:2020-11-26

基金项目:国家重点研发计划(2018YFD0100303);国家自然科学基金(31530053)

第一作者:苏莹,讲师,主要从事棉花耐盐机理研究,E-mail:suying0425@cau.edu.cn

通讯作者:华金平,教授,主要从事棉花遗传育种与基因组研究,E-mail:jinping_hua@cau.edu.cn

相对成活苗率、相对发芽率、相对盐害或芽长、根长等指标作为鉴定指标^[4,8-9],而幼苗期采用相对株高和相对叶面积等指标作为鉴定标准;或测定生理生

化指标^[2-3,10-11],或在生长发育不同时期利用主成分分析、聚类分析或隶属函数法分析多种性状指标,综合反映棉花耐盐性^[12-14]。

表1 棉花耐盐性鉴定方法及指标分类

Table 1 Classification of the identification methods and indexes of cotton salt tolerance

耐盐指标 Salt tolerance index	萌发期 Germination stage	幼苗期 Seedling stage	全生育期 Whole growth period
直接指标 Direct index	发芽势、发芽率、出苗率、缺苗率、干重、鲜重、胚轴长、胚根长等	形态指标:生物量、株高、叶面积、根长、根冠比、叶盘颜色、木质部形态	花粉萌发率、单株铃数、单铃重、株高、果枝数、子棉产量、皮棉产量、纤维品质
间接指标 Indirect index	相对盐害率、相对发芽率	生理指标:离子含量、叶绿素含量、净光合速率、气孔导度、蒸腾速率、 Na^+ 含量、 Na^+/K^+ 、电导率 生化指标:抗氧化酶类活性,如SOD、POD、CAT等;渗透调节物质含量,如甜菜碱、丙二醛含量;过氧化物含量,如 H_2O_2 其他指标:相对盐害率、相对成活苗率、相对株高、活力指数等相对指数、模糊隶属函数、 <i>GhSOS1</i> 基因表达水平、耐盐分子标记	主成分分析、隶属函数值、聚类分析-D、逐步回归 光合速率、叶绿素含量、叶绿素荧光参数

本研究综合分析1990—2021年国内外棉花耐盐性研究相关报道,拟通过比较、综合已有研究结果,提出相对简便快捷、结果稳定可靠、统一可比的鉴定方法,以期为开展大规模棉花材料耐盐性鉴定提供参考。

1 种子萌发期鉴定

棉花种子萌发期耐盐性鉴定使用的发芽基质主要有滤纸和沙子,通过比较发芽势、发芽率、芽长、芽重、干重和鲜重等性状指标,或计算相对发芽率、相对盐害率、相对成苗率等相对指数来评价棉花的耐盐性。

1.1 滤纸为基质

叶武威等^[15]利用双层滤纸法包裹浸涨的棉花种子在培养皿中进行耐盐筛选试验,结果表明,使用质量分数为0.70%~1.10%(摩尔浓度为120~188 mmol/L)的NaCl溶液进行棉花萌发期耐盐性鉴定更为适宜。谢德意等^[16]利用双层滤纸法,滴加0.00%~1.00%、1.20%、1.50%等13个梯度水平的NaCl溶液,统计发芽势和发芽率,发现当

NaCl浓度 $>0.50\%$ (85 mmol/L)时,盐胁迫下发芽势和发芽率与对照差异显著;NaCl浓度 $>0.70\%$ (120 mmol/L)时,差异极显著。张国伟等^[17]设置0(CK)、100、150和200 mmol/L的NaCl浓度梯度进行萌发试验,确定150 mmol/L NaCl为耐盐性鉴定的适宜浓度,以盐害系数隶属函数值和总隶属函数值作为供试棉花品种萌发期的耐盐性鉴定的依据。类似报道还有,白灯莎·买买提艾力等^[18]设置6个NaCl浓度梯度(0(CK)、50、100、150、200和300 mmol/L),比较新疆27个棉花品种的发发芽势和发芽率,采用模糊数学隶属函数法进行耐盐性综合评价,确定150 mmol/L NaCl溶液作为棉花耐盐性鉴定浓度。

王俊娟等^[19]采用滤纸卷直立包裹浸涨种子发芽,设置0(对照)、0.10%、0.20%、0.30%、0.40%、0.60%、0.80%、1.00%、1.20%和1.40%的NaCl溶液处理,测定棉花发芽势、芽长和芽重等指标,结果发现,影响发芽势的NaCl临界浓度为1.20%,而影响芽长和芽重的NaCl临界浓度为0.80%。吴振良等^[20]采用毛巾卷做为基质用0、0.30%、0.45%和

0.60%浓度的 NaCl 溶液浸湿包裹种子进行萌发试验,对 14 个棉花品种种子进行耐盐性鉴定,确定该方法适宜的上限 NaCl 溶液浓度为 0.60%。

以滤纸为基质鉴定棉花耐盐性已有较多应用。利用 150 mmol/L NaCl 溶液进行棉花种子滤纸发芽试验^[21],调查发芽势和发芽率,以相对指数作为耐盐指标,准确鉴定 419 份陆地棉材料的耐盐性。Sun 等^[22]通过在培养皿中加入 0.40%、0.60%、0.80%、1.00%、和 1.20%的 NaCl 溶液,对‘新陆早 17’、‘晋棉 8 号’、‘豫棉 3 号’进行耐盐性鉴定,确定 1.00%的 NaCl 溶液浓度为适宜筛选条件。

1.2 沙培基质

叶武威等^[4]以沙子为发芽基质,利用 NaCl 浓度为 0~1.00%的沙培进行发芽,以相对成活苗率分为 4 级作为耐盐性判定指标:高抗(>90.0%)、抗(75.0%~89.9%)、耐(50.0%~74.9%)和不耐(0.0%~49.9%)。结果发现 0.40% NaCl 浓度时棉花成苗率急剧下降,确定 0.40%的土壤含盐量作为棉花生产中盐胁迫筛选的最佳值。通过模拟自然盐碱地条件^[23-24]设置 5 个盐土浓度,利用沙培方法进行萌发和出苗期耐盐性鉴定,NaCl 浓度为 0(对照)、0.10%、0.20%、0.30%和 0.40%(盐重/干沙干重×100%)。根据 7 d 后的相对出苗率将棉花萌发出苗期耐盐性分为高抗(≥90.0%)、抗(70.0%~89.9%)、耐(50.0%~69.9%)以及不耐(≤50.0%)。结果表明,沙土中 0.30% NaCl 浓度为影响棉花萌发的临界点。沙土中 NaCl≥0.30%,种子萌发受到严重抑制,NaCl<0.30%时,处理和对照出苗率无显著差异。

吴晓东等^[25]对 102 份棉花品种进行耐盐性筛选,以 1.00%的 NaCl 溶液胁迫种子发芽率为标准进行耐盐分级:1 级(高抗,H,>90.0%)、2 级(抗,R,75.0%~89.9%)、3 级(耐,T,50.0%~74.9%)和 4 级(敏感,S,0.0%~49.9%),结果发现种子相对发芽率、相对棉苗干物质质量和相对株高是棉花萌发期耐盐性鉴定的可靠指标。利用石英砂作为基质,浇灌 0.30%(摩尔浓度 51 mmol/L)的 NaCl 溶液,调查棉花相对存活率和盐害指数,从 713 份的陆地棉自然群体筛选到 160 份耐盐品种和 18 份抗盐品种^[26]。刘瑞显等^[27]通过沙培方式,利用 150 mmol/L NaCl 溶液进行处理,以棉花萌发期各个指标的盐害指数的熵值和权重等指标,进行棉花耐盐性鉴定。比较上述研究,以沙培发芽法进行棉花耐盐性鉴定

时,沙土中 NaCl 含量及标准存在差异,有的以“NaCl 重/干沙重”的质量百分数为标准进行盐胁迫处理,也有以不同摩尔浓度或质量浓度的 NaCl 溶液浇灌沙土的方法进行胁迫处理,2 种方法中,实际 NaCl 含量难控制,且试验需要较大空间。

1.3 其他发芽基质

除上述以滤纸和沙子为发芽基质鉴定耐盐性的方法外,陈建平等^[28]利用水培方法,设置 0.30%~1.50%的 NaCl 浓度,在布设多个洞穴的泡沫板中填充基质并播种,鉴定棉花萌发期与苗期耐盐性。有研究以 0.17%~0.23%的 NaCl 溶液中脱绒消毒种子的“吐芽率”(种子生长点裂开,下胚轴露出开口称为吐芽)为指标,快速检测棉花耐盐性^[29]。该方法快速、简便,但结果的可重复性及其与田间成苗率的相关性需进一步验证。

2 幼苗期耐盐性鉴定

棉花出苗后,植株从异养向自养的过渡,盐胁迫可能引起幼苗畸形,严重时叶绿素合成受阻,形成黄化苗。棉苗在二、三叶期体内已开始分化花芽,此时对盐分最为敏感^[30]。因此,棉花幼苗期耐盐性鉴定一般选择两叶或三叶期。已有报道主要以生物量、株高、叶绿素含量、生理生化指标等作为该阶段耐盐性鉴定指标^[2-3,10,13]。

2.1 水培鉴定

Guo 等^[31]采用水培方法,分别以 0、50、100、150 和 200 mmol/L NaCl 溶液处理三叶一心期棉花幼苗,发现 150 mmol/L NaCl 处理后棉花叶片失水萎蔫,随时间延长逐渐恢复,确定 150 mmol/L 是棉花幼苗期耐盐性鉴定适宜的胁迫处理浓度。通过观察胁迫后棉花幼苗表型变化,分析胁迫后 0.5~72.0 h 基因表达的差异情况,确定胁迫后 3、12 和 48 h 为棉花胁迫表型及恢复的关键时间点^[32-33]。利用该方法对陆地棉‘CRI-12’和野生棉‘毛棉’构建的 F_{2:3} 群体进行耐盐性鉴定^[34],胁迫 2 周后获得叶绿素含量、苗高、根长、苗鲜重、根鲜重、苗干重和根干重等表型数据,分析幼苗期耐盐相关 QTL。

此外,也有研究通过水培条件^[35],设置 100、150、200 和 250 mmol/L 的 NaCl 浓度梯度,于幼苗三叶期胁迫处理 10 d 后测定生长指标和生理指标,通过隶属函数和耐盐指数分析,确定 200 mmol/L NaCl 为水培条件筛选适宜浓度,以叶片相对含水量和光合速率作为苗期耐盐性筛选指标。

2.2 盐池鉴定

叶武威等^[4]通过盐池筛选 6 000 余份棉花种质资源,发现在 0.40% NaCl 浓度下棉花最敏感,有利于准确鉴定耐盐性差异,确立了 0.40% 盐量胁迫法(又称盐池鉴定法)作为棉花种质耐盐性鉴定方法,并提出行业鉴定标准。利用 0.40% 盐量胁迫棉花三叶期幼苗,调查 10 d 的成活苗率,将棉花耐盐性分为 4 级:高抗(>90.0%)、抗(75.0%~89.9%)、耐(50.0%~74.9%)和不耐(0.0%~49.9%)。

杨阳^[36]在含有 250 mmol/L NaCl 的盐池中处理两叶一心期棉花幼苗,处理第 5(子叶开始发黄)、7 和 9 天开始调查统计叶片受害情况及第一片真叶绿素含量;第 9 天测量株高及根、茎、叶干重,根据叶片受害程度,分 3 级统计供试材料耐盐性。张香桂等^[37]利用穴盘基质,用 0、1.00%、1.50%、2.00%、2.50% 和 3.00% 的 NaCl 溶液处理两叶一心期棉苗,处理后 3、5 和 7 d 调查子叶受害情况,计算子叶受害指数,分为 5 级:0 级,棉苗无黄叶;1 级,1 片子叶发黄;2 级,2 片子叶均发黄;3 级,1 片子叶受害脱落;4 级,2 片子叶受害脱落。并提出:棉苗 2 叶期,1.50%~2.00% (257~342 mmol/L) NaCl 浓度处理 7 d,可用于批量筛选棉花品种苗期耐盐性。刘雅辉等^[38]采用土壤全盐含量为 0.40% 的原土盐池,土壤全盐含量 0.10% 为对照,调查出苗至二叶期幼苗长势及盐害症状,计算盐害指数,确立棉花苗期(二叶期)耐盐性评价标准。

3 全生育期耐盐性鉴定

盐胁迫最终影响棉花产量和纤维品质,因此在盐渍环境比较棉花全生育期的生长情况和产量也可作为鉴定棉花耐盐性的方法^[30,39]。

姜益娟等^[39]通过分析土壤含盐量对棉花产量和品质的影响,结果发现,土壤总含盐量与产量、单株有效铃、单铃重、株高均呈极显著负相关。土壤含盐量<0.24%,对棉花产量及构成因子起促进作用;含盐量>0.24%,开始产生不良影响;当含盐量>0.50%时,棉花受害逐渐加重。但土壤盐分与纤维品质没有显著的相关性。Guo 等^[40]通过播种前以含盐量 0.50% 的自然地下盐水处理耕地,调查土壤盐分对陆地棉重组自交系群体纤维品质的影响,结果发现土壤盐分提高纤维强度,对其他纤维品质性状无显著影响。

孙小芳等^[41]采用盐化土壤盆钵全生育期栽培

法,设置 0、0.15%、0.30%、0.45% 和 0.60% 的 NaCl 浓度梯度,比较 13 个陆地棉品种的耐盐性。结果表明,鉴定棉花耐盐性的适宜浓度为 0.45% (77 mmol/L),相对籽棉产量可作为鉴定棉花耐盐能力的可靠简易指标。

另外,王俊铎等^[42]利用 pH 8.50~8.60、可溶性盐浓度为 0.54% 的复合盐碱土对 119 份国内外陆地棉品种资源进行耐盐性鉴定,证明了盐胁迫对衣分、铃重和叶绿素的影响较小,而对果节、铃数和叶面积的影响较大。

4 其他鉴定方法

除利用种子萌发期和幼苗期鉴定棉花品种耐盐性外,李付广等^[43]利用棉花组织培养技术,将棉花不同部位组织或细胞培养在加盐培养基中,离体快速鉴定耐盐性。Long 等^[44-45]在棉花幼苗 3~4 片真叶时,利用叶盘法进行离体耐盐性鉴定,取相同节位叶片做成 1 cm 的叶盘,在浓度分别为 0 和 400 mmol/L 的 NaCl 溶液中孵育 4 d,通过观察叶片颜色变化鉴定耐盐性。沈法富等^[46]利用液滴培养技术(sitting drop culture),通过统计不同浓度 NaCl 溶液胁迫培养下花粉萌发率,反映棉花耐盐水平。

利用非损伤微测系统鉴定耐盐性^[47-48],棉花一片真叶时,用含 150 mmol/L NaCl 营养液处理 24 h,利用非损伤微测系统测定根尖的 Na^+ 和 K^+ 的外排流速,计算 Na^+/K^+ 外排流速比, Na^+/K^+ 外排流速比越大,耐盐性越强^[47]。以棉花三叶期在 0.30% NaCl 的沙培条件胁迫 9 d,基于非损伤微测系统测定 Na^+ 离子流,并结合 *GhSOS1* 基因表达情况,鉴定棉花品种耐盐性^[48]。

另外,王为等^[49]采用室内试验和室外试验结合进行耐盐种质筛选,室内采用质量百分比浓度 0.40% 的 NaCl 进行双层滤纸法和沙培法发芽,室外试验采用盐池鉴定(NaCl 浓度 0.00%~0.50%)及海边重盐碱土(可溶性盐含量 0.40%~0.80%),对棉花种质进行多时期、多地点不同水平的耐盐性鉴定。

此外,鉴定棉花种子萌发期耐盐性用到的盐胁迫种类也有差异。盐渍土中盐分类型多样,如氯化物盐、磷酸盐和碳酸盐等。在耐盐性鉴定中,普遍使用中性盐,如 NaCl 和 Na_2SO_4 。但碱性盐,如 NaHCO_3 和 Na_2CO_3 ,在盐渍化土壤中也大量存在。

李双男等^[50]通过设置 NaCl、 Na_2SO_4 和 NaHCO_3 +

Na_2CO_3 3 种胁迫类型,分析不同盐碱对棉花种子萌发的影响。结果发现,中性盐 Na_2SO_4 较 NaCl 对棉花种子萌发表现出更强的抑制作用,碱性盐在 pH 8.60 时促进萌发, pH 9.03 时抑制萌发, pH 10.47 时则完全不萌发。吴巧娟等^[51]以盐碱含量 5.90% 的海水稀释至盐碱含量为 0.35% 作为处理,以纯净水为对照进行沙培发芽试验,第 10 天统计出苗率计算相对盐害率作为耐盐指标。吴新海等^[52]通过在地下咸水、 NaCl 溶液和盐碱原土 3 种情况下进行试验,测定发芽率、出苗率,结果表明, NaCl 溶液中棉花发芽率偏高,地下咸水溶液和盐碱原土胁迫发芽率接近。用 NaCl 单盐溶液进行萌发期耐盐性鉴定,鉴定浓度为 0.50% (摩尔浓度 86 mmol/L) 较适合;用地下咸水和盐碱原土进行鉴定,可溶性盐含量为 0.40% 较适合;且认为地下咸水最切合生产实际。

5 存在问题及展望

由于不同报道中,关于 NaCl 浓度计算标准不一致(表 2)。萌发阶段使用的 NaCl 质量浓度范围多为 0.30%~1.50%,通过比较,认为适宜的筛选浓度为 0.40%~1.00%;而采用摩尔浓度的标准,使用的范围为 100~300 mmol/L,且多数研究表明,适宜的筛选浓度为 150 mmol/L 的 NaCl 溶液。

棉花种子萌发与出苗是田间成苗的关键,盐胁迫下不同基因型的棉花品种发芽率和出苗率存在显著差异^[14,18,23,30],因此在萌发期和幼苗期可直接评价棉花的耐盐性。综合已有研究,在萌发和出苗期,室内条件下,盐胁迫发芽或者出苗试验,盐胁迫条件容易控制,其中以滤纸为发芽基质的方法,操作简单、快速、宜重复,可作为鉴定棉花品种耐盐性的主要方法,但双层滤纸法易发霉,影响鉴定结果。室外条件进行棉花苗期耐盐性鉴定,多以砂培、土培或盐碱原土为发芽基质,用于筛选的 NaCl 浓度范围为 0.30%~1.20%^[4,23],最高达到 2.00%^[37],但参试品种、苗龄及发芽基质^[52]等方面的不一致,均影响鉴定结果。土壤中可溶性盐含量与盐种类难以统一,且大田鉴定时,土壤含盐量也会受气候影响。因此,室内采用滤纸卷法,以 150 mmol/L (质量分数为 0.87%,表 2) NaCl 为适宜胁迫浓度,筛选指标为发芽率、相对发芽率或相对盐害率(表 1),进行耐盐性鉴定,可作为首选方法。室外条件下采用含盐量

表 2 不同 NaCl 浓度计量对比

Table 2 Comparison of different standards of NaCl concentration

质量百分比浓度/% Mass percentage concentration	摩尔浓度/(mmol/L) Molar concentration
0.00 a	0 a
0.10 a	17
0.15 a	26
0.20 a	34
0.24 a	41
0.30 a	51
0.40 a	68
0.45 a	77
0.50 a	86
0.58	100 a
0.60 a	103
0.70 a	120
0.80 a	137
0.88	150 a
1.00 a	171
1.10 a	188
1.17	200 a
1.20 a	205
1.40 a	240
1.46	250 a
1.50 a	257
1.75	300 a
2.00 a	342

注:a,表示文献中使用的 NaCl 计量浓度标准。

Note: a, the measurement concentration standards of NaCl used in the reference.

0.40% 的盐池处理棉花三叶期幼苗 10 d,统计成活苗率,鉴定棉花苗期耐盐性。

利用自然盐碱土进行棉花全生育期的耐盐性鉴定,有利于指导生产实践,但该鉴定方式缺乏系统性评价。利用田间自然盐碱土进行鉴定,存在盐度分布不均匀的情况,且土壤含盐量受年份和气候影响较大。由于自然环境因素的不确定性,如降雨量和积温等,影响自然盐碱土的土壤盐度,降低年份间鉴

定结果重复性和精确性,且不同盐碱地环境,鉴定结果/趋势也存在差异,因此室内鉴定与田间鉴定结果可能会出现较大差异,并且该方法测定周期长,成本高。目前新疆是中国棉花的主产区,利用新疆盐碱土建立盐度均匀的盐池或土壤盐分均匀的地块,进行多年多点的全生育期耐盐鉴定对指导生产实践有重要意义。

参考文献 References

- [1] Chinnusamy V, Zhu J H, Zhu J K. Salt stress signaling and mechanisms of plant salt tolerance[M]//Edited by Setlow J K. In: *Genetic Engineering Principles and Methods*, Boston: Kluwer Academic Publishers, 2006
- [2] 许艳超, 韦洋洋, 李振庆, 蔡小彦, 王玉红, 王星星, 张振梅, 王坤波, 刘方, 周忠丽. 复合盐碱胁迫下半野生棉苗期耐盐性综合评价及其关键生理指标的变化[J]. *棉花学报*, 2018, 30(3): 231-241
- Xu Y C, Wei Y Y, Li Z Q, Cai X Y, Wang Y H, Wang X X, Zhang Z M, Wang K B, Liu F, Zhou Z L. Integrated evaluation and the physiological and biochemical responses of semi-wild cotton under complex salt-alkali stress[J]. *Cotton Science*, 2018, 30(3): 231-241(in Chinese)
- [3] 戴海芳, 武辉, 阿曼古丽·买买提阿力, 王立红, 麦麦提·阿皮孜, 张巨松. 不同基因型棉花苗期耐盐性分析及其鉴定指标筛选[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(7): 1290-1300
- Dai H F, Wu H, Amanguli · Maimaitiali, Wang L H, Maimaiti · Apizi, Zhang J S. Analysis of salt-tolerance and determination of salt-tolerant evaluation indicators in cotton seedlings of different genotypes [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(7): 1290-1300 (in Chinese)
- [4] 叶武威, 刘金定. 棉花种质资源耐盐性鉴定技术与应用[J]. *中国棉花*, 1998, 25(9): 34-38
- Ye W W, Liu J D. Identification technology and application of salt tolerance of cotton germplasm resources[J]. *China Cotton*, 1998, 25(9): 34-38 (in Chinese)
- [5] 张丽娜, 叶武威, 王俊娟, 樊保香. 棉花耐盐性的 SSR 标记研究[J]. *棉花学报*, 2010, 22(2): 175-180
- Zhang L N, Ye W W, Wang J J, Fan B X. Studies of salinity-tolerance with SSR markers on *Gossypium hirsutum* L.[J]. *Cotton Science*, 2010, 22(2): 175-180 (in Chinese)
- [6] 刘雅辉, 王秀萍, 鲁雪林, 张国新, 李强. 棉花耐盐相关序列扩增多态性(SRAP)分子标记筛选[J]. *江苏农业学报*, 2015, 31(3): 484-488
- Liu Y H, Wang X P, Lu X L, Zhang G X, Li Q. Selection of sequence-related amplified polymorphism molecular marker associated with salt tolerance of cotton[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2015, 31(3): 484-488 (in Chinese)
- [7] 徐鹏, 蔡继鸿, 杨阳, 郭琪, 张香桂, 徐珍珍, 沈新莲. 陆地棉耐盐相关 EST-SSR 以及 EST-InDel 分子标记的开发[J]. *棉花学报*, 2016, 28(1): 65-74
- Xu P, Cai J H, Yang Y, Guo Q, Zhang X G, Xu Z Z, Shen X L. Development of EST-SSR and EST-InDel markers associated with salt tolerance in upland cotton [J]. *Cotton Science*, 2016, 28(1): 65-74 (in Chinese)
- [8] 徐佳陵, 曾文官, 袁延超, 邢会贤, 王浩然, 毛丽丽, 宋宪亮, 孙学振. 陆地棉种质资源萌发出苗期耐盐性鉴定[J]. *山东农业科学*, 2017, 49(9): 32-36
- Xu J L, Zeng W G, Yuan Y C, Xing H X, Wang H R, Mao L L, Song X L, Sun X Z. Salt tolerance evaluation at germination stage of upland cotton germplasms[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2017, 49(9): 32-36 (in Chinese)
- [9] 杨淑萍, 危常州, 梁永超. 新疆主要棉花品种耐盐性筛选与鉴定[J]. *干旱区研究*, 2013, 30(6): 1129-1135
- Yang S P, Wei C Z, Liang Y C. Identification and screening of salt tolerance of main cotton varieties in Xinjiang[J]. *Arid Zone Research*, 2013, 30(6): 1129-1135 (in Chinese)
- [10] 刘娜, 曲延英, 高文伟, 黄雅婕, 杨涛, 张茹, 安秋双. 陆地棉光合和生理生化指标的耐盐性鉴定[J]. *新疆农业科学*, 2019, 56(3): 403-410
- Liu N, Qu Y Y, Gao W W, Huang Y J, Yang T, Zhang R, An Q S. Identification of salt tolerance of photosynthesis and physiochemical indexes of *Gossypium hirsutum* [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2019, 56(3): 403-410 (in Chinese)
- [11] Dong Y T, Hu G J, Yu J W, Thu S W, Grover C E, Zhu S, Wendel J F. Salt-tolerance diversity in diploid and polyploid cotton (*Gossypium*) species[J]. *The Plant Journal*, 2020, 101(5): 1135-1151
- [12] 郑巨云, 曾辉, 王俊锋, 龚照龙, 梁亚军, 艾先涛, 郭江平, 冯国伟, 莫明, 李雪源. 陆地棉品种资源萌发期耐盐性的隶属函数法评价[J]. *新疆农业科学*, 2018, 55(9): 1579-1592
- Zheng J Y, Zeng H, Wang J D, Gong Z L, Liang Y J, Ai X T, Guo J P, Feng G W, Mo M, Li X Y. Comprehensive assessment of salt tolerance of the upland cotton varieties resources in seedling stage by membership function method[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2018, 55(9): 1579-1592 (in Chinese)
- [13] 王宁, 冯克云, 南宏宇, 张鹏忠, 谢捷. 甘肃河西走廊棉区棉花萌发期和苗期耐盐性鉴定与评价[J]. *干旱地区农业研究*,

- 2018, 36(1): 148-155
- Wang N, Feng K Y, Nan H Y, Zhang P Z, Xie J. Salt tolerance identification and evaluation of cotton at its germination and seedling stages in Hexi area of Gansu[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(1): 148-155 (in Chinese)
- [14] 刘伟, 钱玉源, 张海娜, 韩轩, 崔淑芳, 王广恩, 金卫平, 李俊兰. 12 个陆地棉品种(系)苗期耐盐性鉴定评价[J]. 作物研究, 2017, 31(1): 37-41
- Liu Y, Qian Y Y, Zhang H N, Han X, Cui S F, Wang G E, Jin W P, Li J L. Identification and evaluation of 12 varieties or lines of *Gossypium hirsutum* based on seedling salt tolerance[J]. *Crop Research*, 2017, 31(1): 37-41 (in Chinese)
- [15] 叶武威, 刘金定. 氯化钠和食用盐对棉花种子萌发的影响[J]. 中国棉花, 1994, 21(3): 14-15
- Ye W W, Liu J D. Effects of sodium chloride and edible salt on cotton seed germination[J]. *China Cotton*, 1994, 21(3): 14-15 (in Chinese)
- [16] 谢德意, 王惠萍, 王付欣, 冯复全. 盐胁迫对棉花种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 种子, 2000, 19(3): 12-13
- Xie D Y, Wang H P, Wang F X, Feng F Q. Effects of cotton seeds on seed germination and seedling growth under salt stress[J]. *Seed*, 2000, 19(3): 12-13 (in Chinese)
- [17] 张国伟, 路海玲, 张雷, 陈兵林, 周治国. 棉花萌发期和苗期耐盐性评价及耐盐指标筛选[J]. 应用生态学报, 2011, 22(8): 2045-2053
- Zhang G W, Lu H L, Zhang L, Chen B L, Zhou Z G. Salt tolerance evaluation of cotton (*Gossypium hirsutum*) at its germinating and seedling stages and selection of related indices[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(8): 2045-2053 (in Chinese)
- [18] 白灯莎·买买提艾力, 张少民, 孙良斌, 李寒暄, 宁新民, 孔杰, 冯固. 新疆不同年代 27 个棉花品种(系)种子萌发阶段耐盐能力比较[J]. 西北农业学报, 2012, 21(1): 72-79
- Baidengsha · Maimaitiaili, Zhang S M, Sun L B, Li H M, Ning X M, Kong J, Feng G. Comparisons of salt resistances during germination stage among 27 cotton varieties (line) grown in Xinjiang[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2012, 21(1): 72-79 (in Chinese)
- [19] 王俊娟, 叶武威, 周大云, 吕有军, 樊保香, 宋丽艳. 盐胁迫下不同耐盐类型棉花的萌发特性[J]. 棉花学报, 2007, 19(4): 315-317
- Wang J J, Ye W W, Zhou D Y, Lv Y J, Fan B X, Song L Y. Studies on germination characteristics of different salinity-resistant cotton under salt stress[J]. *Cotton Science*, 2007, 19(4): 315-317 (in Chinese)
- [20] 吴振良, 刘丽英, 戴茂华. 利用毛巾卷盐胁迫快速评价棉花品种的耐盐性[J]. 河北农业科学, 2011, 15(10): 26-28
- Wu Z L, Liu L Y, Dai M H. Study on rapid evaluation of salt tolerance of cotton varieties by towel roll salt stress method tests[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2011, 15(10): 26-28 (in Chinese)
- [21] Yasir M, He S P, Sun G F, Geng X L, Pan Z E, Gong W F, Jia Y H, Du X M. A genome-wide association study revealed key SNPs/genes associated with salinity stress tolerance in upland cotton[J/OL]. *Genes*, [2020-01-10]. DOI: 10.3390/genes10100829
- [22] Sun H, Meng M H, Yan Z H, Lin Z X, Nie X H, Yang X Y. Genome-wide association mapping of stress-tolerance traits in cotton[J]. *The Crop Journal*, 2019, 7(1): 77-88
- [23] 王俊娟, 叶武威, 王德龙, 樊伟莉. 几个陆地棉品种萌发出苗期耐盐性差异比较[J]. 中国棉花, 2010, 37(1): 7-9
- Wang J J, Ye W W, Wang D L, Fan W L. Comparison of salt tolerance of several Upland cotton cultivars at germination and seedling stages [J]. *China Cotton*, 2010, 37(1): 7-9 (in Chinese)
- [24] 王俊娟, 樊伟莉, 叶武威, 王德龙. 陆地棉萌发出苗期耐盐鉴定方法的研究及应用[J]. 江苏农业科学, 2010, 38(2): 87-88
- Wang J J, Fan W L, Ye W W, Wang D L. Study and application of salt tolerance identification method of Upland cotton at germination stage [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2010, 38(2): 87-88(in Chinese)
- [25] 吴晓东, 孙长君, 李书涛, 王巍, 王子胜. 特早熟耐盐型棉花品种(系)筛选及萌发期耐盐鉴定方法探讨[J]. 中国棉花, 2013, 40(3): 12-15
- Wu X D, Sun C J, Li S T, Wang W, Wang Z S. Screening of salt tolerant and extremely-early-matured cotton varieties and their salt tolerance in sprouting[J]. *China Cotton*, 2013, 40(3): 12-15 (in Chinese)
- [26] Sun Z W, Li H L, Zhang Y, Li Z K, Ke H F, Wu L Q, Zhang G Y, Wang X F, Ma Z Y. Identification of SNPs and candidate genes associated with salt tolerance at the seedling stage in cotton (*Gossypium hirsutum* L)[J/OL]. *Frontiers in Plant Science*, [2020-11-02]. DOI: 10.3389/fpls.2018.01011
- [27] 刘瑞显, 张国伟, 杨长琴. 基于熵权理论的灰色关联度法在棉花耐盐性评价中的应用[J]. 核农学报, 2017, 31(2): 402-409
- Liu R X, Zhang G W, Yang C Q. Using gray related degree method based on entropy weight theory to evaluate salt tolerance of cotton [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(2): 402-409 (in Chinese)

- [28] 陈建平, 高进, 王永慧, 王海洋, 蔡立旺, 施庆华, 王为, 戚永奎, 潘宗瑾. 一种水培快速鉴定棉花种质耐盐性的方法和应用. 中国, CN201410431733.0[P]. 2015-01-07
Chen J P, Gao J, Wang Y H, Wang H Y, Cai L W, Shi Q H, Wang W, Qi Y K, Pan Z J. A method to rapidly determination of salt tolerance in cotton germplasm by hydroponic culture. China, CN201410431733.0[P]. 2015-01-07 (in Chinese)
- [29] 朱永红, 潘转霞, 夏芝, 赵俊侠, 王伟, 张安红, 孙振纲. 快速检测棉花品种耐盐性的方法. 中国, CN201410112868.0[P]. 2014-06-11
Zhu Y H, Pan Z X, Xia Z, Zhao J X, Wang W, Zhang A H, Sun Z G. A method for rapid determination of salt tolerance of cotton varieties. China, CN201410112868.0[P]. 2014-06-11 (in Chinese)
- [30] 孙小芳, 刘友良, 陈沁. 棉花耐盐性研究进展[J]. 棉花学报, 1998, 10(3): 7-13
Sun X F, Liu Y L, Chen Q. Recent progresses in studies on salinity tolerance in cotton[J]. *Cotton Science*, 1998, 10(3): 7-13 (in Chinese)
- [31] Guo J Y, Shi G Y, Guo X Y, Zhang L W, Xu W Y, Wang Y M, Su Z, Hua J P. Transcriptome analysis reveals that distinct metabolic pathways operate in salt-tolerant and salt-sensitive upland cotton varieties subjected to salinity stress[J]. *Plant Science*, 2015, 238: 33-45.
- [32] Zhang X, Zhen J B, Li Z H, Kang D M, Yang Y, Kong J, Hua J P. Expression profile of early responsive genes under salt stress in upland cotton (*Gossypium hirsutum* L)[J]. *Plant Molecular Biology Reporter*, 2011, 29(3): 626-637.
- [33] 郭晓燕. 利用基因芯片筛选棉花盐胁迫下差异表达基因及全长 cDNA 文库构建[D]. 北京: 中国农业大学, 2010
Guo X Y. Screening of the differentially expressed genes under salt stress in cotton by microarray and construction of the full length cDNA library [D]. Beijing: China Agricultural University, 2010 (in Chinese)
- [34] Oluoch G, Zheng J Y, Wang X X, Khan M K R, Zhou Z L, Cai X Y, Wang C Y, Wang Y H, Li X Y, Wang H, Liu F, Wang K B. QTL mapping for salt tolerance at seedling stage in the interspecific cross of *Gossypium tomentosum* with *Gossypium hirsutum*[J]. *Euphytica*, 2016, 209(1): 223-235
- [35] Sikder R K, Wang X R, Jin D S, Zhang H H, Gui H P, Dong Q, Pang N C, Zhang X L, Song M Z. Screening and evaluation of reliable traits of upland cotton (*Gossypium hirsutum* L) genotypes for salt tolerance at the seedling growth stage[J]. *Journal of Cotton Research*, 2020, 3(1): 1-13
- [36] 杨阳. 棉花耐盐材料的筛选及耐盐相关功能标记的开发[D]. 南京: 南京农业大学, 2015
Yang Y. Screening salt-tolerant germplasm and development of functional markers related to salt stress in cotton [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015 (in Chinese)
- [37] 张香桂, 沈新莲, 徐鹏, 倪万潮, 郭琪, 徐珍珍, 孟珊. 棉花苗期耐盐性鉴定方法与应用[J]. 农业与技术, 2017, 37(19): 1-4
Zhang X G, Shen X L, Xu P, Ni W C, Guo Q, Xu Z Z, Meng S. Identification method and application of salt tolerance in cotton seedling stage[J]. *Agriculture and Technology*, 2017, 37(19): 1-4 (in Chinese)
- [38] 刘雅辉, 王秀萍, 张国新, 鲁雪林, 张亚丽. 棉花苗期耐盐性评价方法研究[J]. 现代农业科技, 2011(7): 11-16
Liu Y H, Wang X P, Zhang G X, Lu X L, Zhang Y L. Research on evaluation method of salt tolerance at seedling stage in cotton [J]. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, 2011(7): 11-16 (in Chinese)
- [39] 姜益娟, 郑德明, 吕双庆, 高林艳. 土壤含盐量对棉花产量和品质的影响[J]. 新疆农业科学, 1995(3): 116-118
Jiang Y J, Zheng D M, Lv S Q, Gao L Y. Effect of soil salt content on cotton yield and quality[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 1995(3): 116-118 (in Chinese)
- [40] Guo A H, Su Y, Huang Y, Wang Y M, Nie H S, Zhao N, Hua J P. QTL controlling fiber quality traits under salt stress in upland cotton (*Gossypium hirsutum* L)[J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2021, 134(2): 661-685
- [41] 孙小芳, 刘友良. 棉花品种耐盐性鉴定指标可靠性的检验[J]. 作物学报, 2001, 27(6): 794-801
Sun X F, Liu Y L. Test on criteria of evaluating salt tolerance of cotton cultivars[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27(6): 794-801 (in Chinese)
- [42] 王俊铎, 曾辉, 龚照龙, 梁亚军, 艾先涛, 郭江平, 莫明, 李雪源, 郑巨云. 陆地棉品种资源耐复合盐碱性综合评价分析[J]. 中国农业科技导报, 2019, 21(10): 1-11
Wang J D, Zeng H, Gong Z L, Liang Y J, Ai X T, Guo J P, Mo M, Li X Y, Zheng J Y. Comprehensive assessment of complex salt-alkali tolerance of the Upland cotton varieties resources[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2019, 21(10): 1-11 (in Chinese)
- [43] 李付广, 李秀兰, 李凤莲. 离体快速鉴定棉花耐盐性初报[J]. 中国棉花, 1992, 19(6): 16-17
Li F G, Li X L, Li F L. Preliminary report on the rapid identification of salt tolerance of cotton *in vitro* [J]. *China Cotton*, 1992, 19(6): 16-17 (in Chinese)

- [44] Long L, Gao W, Xu L, Liu M, Luo X Y, He X, Yang X Y, Zhang X L, Zhu L F. *GbMPPK3*, a mitogen-activated protein kinase from cotton, enhances drought and oxidative stress tolerance in tobacco [J]. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 2014, 116(2): 153-162
- [45] Long L, Yang W W, Liao P, Guo Y W, Kumar A, Gao W. Transcriptome analysis reveals differentially expressed ERF transcription factors associated with salt response in cotton[J]. *Plant Science*, 2019, 281: 72-81
- [46] 沈法富, 尹承侗, 于元杰, 刘凤珍, 程立. 棉花植株和花粉耐盐性的鉴定[J]. 作物学报, 1997(5): 620-625
Shen F F, Yin C F, Yu Y J, Liu F Z, Cheng L. Screening of whole plants and pollen grains of cotton for salt tolerance[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1997, 23(5): 620-625 (in Chinese)
- [47] 董合忠, 孔祥强, 罗振, 代建龙, 李维江, 辛承松, 唐薇, 张冬梅. 一种棉花耐盐性鉴定方法. 中国, CN201210032674.0[P]. 2012-07-18
Dong H Z, Kong X Q, Luo Z, Dai J L, Li W J, Xin C S, Tang W, Zhang D M. The method for identifying the salt tolerance of cotton. China, CN201210032674.0[P]. 2012-07-18 (in Chinese)
- [48] 王宁, 严根土, 石建斌, 许庆华, 周红, 苏桂兰. 一种鉴定棉花苗期耐盐性的方法. 中国, CN201610986224.3[P]. 2019-09-06
Wang N, Yan G T, Shi J B, Xu Q H, Zhou H, Su G L. A method for determining the salt tolerance of cotton at seedling stage. China, CN201610986224.3 [P]. 2019-09-06 (in Chinese)
- [49] 王为, 潘宗瑾, 潘群斌, 蔡立旺, 陈建平, 汪保华, 王长彪, 陈浩东. 一种棉花耐盐种质鉴定方法. 中国, CN201110041151.8[P]. 2011-09-07
Wang W, Pan Z J, Pan Q B, Cai L W, Chen J P, Wang B H, Wang C B, Chen H D. The method for identifying the salt tolerance of cotton germplasm. China, CN201110041151.8[P]. 2011-09-07 (in Chinese)
- [50] 李双男, 郭慧娟, 王晶, 闵伟, 侯振安. 不同盐碱胁迫对棉花种子萌发的影响[J]. 种子, 2018, 37(1): 38-45
Li S N, Guo H J, Wang J, Min W, Hou Z A. Effects of different saline and alkaline stress on seed[J]. *Seed*, 2018, 37(1): 38-45 (in Chinese)
- [51] 吴巧娟, 刘剑光, 赵君, 肖松华. 棉花耐盐碱性状的 QTL 定位[J]. 江苏农业学报, 2014, 30(5): 966-971
Wu Q J, Liu J G, Zhao J, Xiao S H. QTL mapping of tolerance to salt and alkali in cotton (*Gossypium hirsutum* L) [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2014, 30(5): 966-971 (in Chinese)
- [52] 吴新海, 孙景合, 王秀萍, 刘雅辉. 耐盐鉴定基质对棉花种子萌发的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(6): 3206-3207, 3209
Wu X H, Sun J H, Wang X P, Liu Y H. Effects of testing substrates on cotton seed germination in identification of salt tolerance[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(6): 3206-3207, 3209 (in Chinese)

责任编辑: 吕晓梅