

769 份绿豆种质资源萌发期耐盐性鉴定

李诗晴^{1, 2}, 王素华², 张耀文¹, 王丽侠^{1, 2}

(¹ 山西农业大学农学院, 太谷 030801; ² 中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081)

摘要: 萌发期耐盐性是绿豆在盐碱地利用的重要指标, 鉴定萌发期高度耐盐的种质可提高盐渍化土地的利用率。本研究基于 769 份绿豆种质资源, 参照预实验各指标值, 选择 1.2% NaCl 为鉴定溶液, 通过水培试验测定发芽率(GR)、发芽势(GP)、发芽指数(GI)、相对盐害率等指标, 评估了绿豆资源萌发期的耐盐性。结果表明, 1.2% NaCl 盐胁迫下绿豆种质的平均发芽率为 52.9%, 不同地区间以东亚区的平均发芽率最高(66.5%), 国内则是东北区最高(57.4%); 盐胁迫下各指标中发芽势变异程度最高(变异系数为 58.0%), 其中华北区的变异程度最大, 变异系数达 63.2%; 种皮性状中以褐色籽粒群体耐盐性明显弱于其他籽粒颜色群体, 种皮光泽则是明面种质显著强于毛面; 分析发现绿豆种子百粒重与其耐盐性显著相关, 百粒重 3 g 以下的绿豆种质的耐盐性有极显著变弱趋势。本研究结果为绿豆耐盐种质的筛选及品种选育提供数据支撑。

关键词: 绿豆; 种质资源; 萌发期; 耐盐性; 表型变异

Salt Tolerance Identification of 769 Mung Bean Germplasm at Germination Stage

LI Shiqing^{1, 2}, WANG Suhua², ZHANG Yaowen¹, WANG Lixia^{1, 2}

(¹ College of Agronomy, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801; ² Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: The salt tolerance of mung bean at germination stage is an important index for its utilization in saline-alkali soil. Identification of germplasm with high salt tolerance at germination stage can improve the utilization rate of salinization land. In the present study, based on the pre-experiment, we selected 1.2% NaCl as the best solution for identification of 769 mung bean accessions at their germination stage, by measuring germination rate(GR), germination potential(GP), germination index(GI), relative salt damage rate and other indexes through hydroponic experiments. The results showed that the average germination rate of mung bean germplasm under 1.2% NaCl salt stress was 52.9%. Among different regions, the average germination rate of resources from East Asia is the highest (66.5%), while it is the highest from Northeast China (57.4%). The degree of variation in germination potential is the highest among all indexes under salt stress (CV: 58.0%), particularly the germplasm from the North China region, its coefficient of variation reached 63.2%. In terms of seed coat traits, the salt tolerance of brown-grained germplasm was notably weaker than that of other colored seeds, while the germplasm with luster seed coat had significantly greater tolerance than the dull-surfaced resources. The analysis revealed a significant correlation between the 100-seed weight and their salt tolerance, with germplasm weighing less than 3 g

收稿日期: 2024-08-18

第一作者研究方向为食用豆资源优质基因的发掘, E-mail: leesqaq@163.com

通信作者: 王丽侠, 研究方向为食用豆种质资源评价鉴定及创新利用, E-mail: wanglixia03@caas.cn

基金项目: 国家食用豆产业技术体系(CARS-08); 国家重点研发计划(2019YFD1001303, 2019YFD1001300)

Foundation projects: China Agriculture Research System-Food Legumes (CARS-08); National Key R&D Program of China (2019YFD1001303, 2019YFD1001300)

showing a marked decrease in salt tolerance. This study offer data support for the selection of salt-tolerant germplasm and variety breeding in mung bean.

Key words: mung bean [*Vigna radiate*(L.) Wilczek]; germplasm resources; germination stage; salt tolerance; phenotypic variation

土壤盐渍化是指可溶性盐离子在土壤表层(0~30 cm)积聚,致使土壤中含盐量大于 0.15%,导致土壤呈现不良特性和质量下降,从而影响植物生长和农业生产^[1-2]。目前全球盐渍土总面积约 1.1×10^9 hm²,且随自然气候和人为因素的影响而不断扩大,据不完全统计,每年因盐害造成的农业生产损失超过 1.2×10^{10} 美元^[3-4]。我国盐渍土总面积约为 3.69×10^7 hm²,从热带到寒温带、滨海到内陆、湿润地区到极端干旱区的广袤地区均有分布^[1,5-6],盐渍化土地使作物减产 20%~50%,甚至绝收^[7]。盐渍土治理以往是通过挖深沟加大水漫灌等办法压低盐度,但其成本较高,所以应转变传统思路,从“改地适种”到“改种适地”,挖掘作物本身的耐盐能力,通过耐盐性鉴定筛选耐盐品种,因地制宜合理利用盐渍化土地种植耐盐作物,是具有生态和经济双重效应的解决方案^[8-9]。绝大多数盐渍土壤的盐分混有多种不同比例的中性盐和碱性盐,不同地区盐渍土的盐分比例各异,但考虑到盐渍土壤中 NaCl 的含量比较高,因此选择 NaCl 作为作物耐盐性研究的胁迫物质具有代表性和实际意义^[10]。

绿豆(*Vigna radiata* L.)是我国重要的杂粮作物,具有耐贫瘠、抗旱、适应环境能力强等优良特性^[11]。然而,受市场价格、主产区种植结构调整、种植效益以及国家相关政策等因素的影响,近年来我国绿豆种植面积呈先增后减的态势^[12-14]。据研究,绿豆耐盐能力相对较强,比如张秀玲^[15]研究发现绿豆发芽对 NaCl 耐受的极限浓度为 400 mmol/L,而当 NaCl 浓度达到 330 mmol/L 时,大豆胚轴的生长被完全抑制^[16],王维^[17]发现当 NaCl 浓度为 250 mmol/L 时,157 份供试小麦种子均不发芽。可见,绿豆是盐渍化土壤改良的优良作物之一。开展绿豆耐盐胁迫研究,筛选耐盐种质资源,培育耐盐品种,充分利用盐渍土发展绿豆种植业,既不与大作物争地,有效保障绿豆产业的可持续发展,对于盐渍化土地利用也具有重要的实践意义^[18]。

由于萌发期是植株生长发育的初始阶段,该时期的耐盐性是决定其在盐渍土上正常出苗的基本条件^[19],因此,本研究基于绿豆芽期耐盐评价的最佳浓度筛选,评估了 769 份绿豆种质在盐胁迫下萌发期的发芽率、发芽势、发芽指数和相对盐害率等指标,为绿豆耐盐种质筛选及品种选育提供数据支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试绿豆种质是来自国内外 11 个地区共 34 个来源地的 769 份绿豆种质资源(内蒙古行政区划属于华北区,但种植区域气候特征属于东北,故划入东北区)(表 1),占国家作物种质库绿豆库存资源总量的 10%以上。上述种质于 2022 年冬季在海南三亚种植并收获。

表 1 769 份绿豆种质的来源地信息

Table 1 Source information of 769 mung bean germplasm

地区 Region	来源地 Location	种质数 Number of germplasm	地区 Region	来源地 Location	种质数 Number of germplasm
中国东北区 Northeast China area	黑龙江	13	中国华南区 South China area	广东	4
	吉林	48		广西	5
	辽宁	22		海南	7
	内蒙古	85		甘肃	6
中国华北区 North China area	北京	26	中国西北区 Northwest China area	宁夏	5
	河北	103		陕西	16
	山西	38		新疆	4
	天津	6		重庆	5
中国华东区 East China area	安徽	30	中国西南区 Southwest China area	云南	1
	江苏	38		贵州	6
	江西	6		四川	8
	山东	53		南亚区 South Asia area	亚蔬
中国华中区 Central China area	台湾	1	东南亚区 Southeast Asia area	印度	2
	浙江	1		菲律宾	3
	河南	77		泰国	1
	湖北	46		东亚区 East Asia area	日本
	湖南	16	非洲区 African area	马达加斯加	1

1.2 试验设计

萌发期耐盐性鉴定分两步进行：（1）确定最佳筛选盐浓度。在供试绿豆种质资源中随机选择 4 份绿豆资源（C0072、C0427、C1018、C1065）为试验材料，在不同盐浓度（0.7%/0.9%/1.2%/1.4% NaCl）处理下，以蒸馏水为对照，确定最适筛选盐浓度，当盐害指数（SII）为对照的 50%时的 NaCl 浓度被认为是最佳的筛选盐浓度^[20]。（2）筛选耐盐性强的绿豆资源。选用适宜的筛选盐浓度对 769 个绿豆资源进行耐盐性筛选鉴定。

两个试验均选择大小一致、均匀饱满的绿豆种子进行实验，在各种质中分别挑选种子 20 粒，所有种子经 75%酒精消毒 60 s，无菌水冲洗 3 次后分两组（盐处理组与对照组）放置于发芽板上，将发芽板置于垫有滤纸的匣子中，各匣加入溶液使种子浸泡在 1000 mL 的蒸馏水（对照）或等量的盐溶液中，并上覆遮光盖子，同时以最大程度减少蒸发，发芽温度为室温（24~26℃），溶液与滤纸每 24 h 更换一次，保证绿豆种子发芽所需水分的同时控制盐浓度。分别记录各组种子第 24 h、48 h、72 h、96 h 的发芽数（胚根长度与种子籽粒的长度等长，两片子叶叶瓣完好或破裂低于 1/3，即为发芽），重复 3 次。

1.3 测定指标及方法

发芽率= (发芽种子数/供试种子数) × 100% (以胚根长达到种子长为发芽标准) ;

发芽势= (第 48 h 发芽的种子数/供试种子数) × 100%;

发芽指数= $\sum Gt/Dt$ (Gt 表示 DT 发芽的种子数, Dt 表示对应的时间) ;

相对盐害率= (对照 GR-盐处理 GR) / 对照 GR × 100%

耐盐指数= 处理组的参数指标 / 对照组的参数指标;

盐害指数= 1-STI。

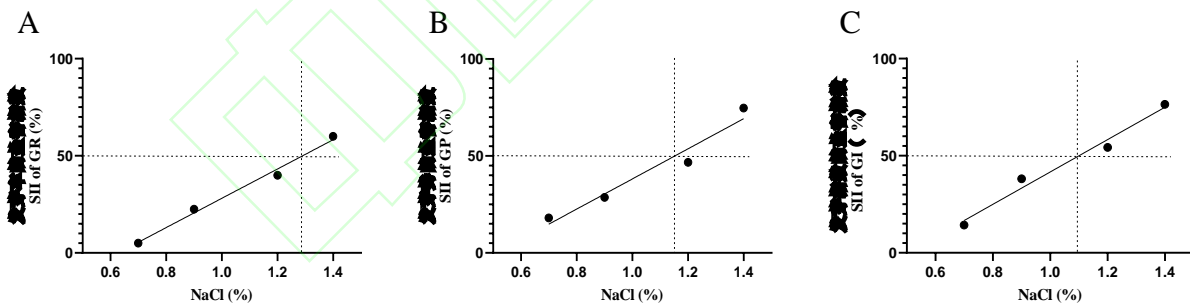
1.4 数据统计及分析

利用 Microsoft Excel 2021 进行数据处理及图表转化; 各处理间的多因素方差分析以及各处理的单因素方差分析用 SPSS 23.0 软件处理; Graphpad prime 软件制作图表。

2 结果与分析

2.1 绿豆萌发期耐盐性鉴定最佳 NaCl 浓度筛选

分析预实验中不同浓度下发芽率、发芽势、发芽指数、平均盐害指数等数据发现, 4 份绿豆种质发芽率的盐害指数至 50% 时对应的盐浓度是 1.29% NaCl (图 1 A); 在 NaCl 浓度为 1.15% 时, 发芽势的盐害指数为对照的 50% (图 1 B); 发芽指数的盐害指数至 50% 时 NaCl 浓度为 1.10% NaCl (图 1 C); 各个参数指标的平均盐害指数值为 50% 时对应的盐浓度为 1.18% NaCl。按照就近原则, 本研究选择采用 1.2% NaCl 作为萌发期耐盐筛选浓度。



SII: 盐害指数; GR: 发芽率; GP: 发芽势; GI: 发芽指数

SII: salt injury index; GR: germination rate; GP: germination potential; GI: germination index

图中数据是 NaCl 胁迫下 4 份绿豆种质各参数的平均值

The data in the figure are the means for each parameter of four mung bean germplasm under salt stress

图 1 绿豆种质芽期耐盐性鉴定最适 NaCl 浓度的筛选

Fig.1 Screening of the optimal NaCl concentration for evaluating salt tolerance during the germination stage of mung bean germplasm

2.2 绿豆种质萌发期耐盐性指标变异

利用 1.2% NaCl 溶液对 769 份绿豆种质进行萌发期耐盐性鉴定, 结果显示, 769 份绿豆种质中 50% 的种质其发芽率在 40.0%~66.7% 之间, 平均发芽率为 52.9% (表 2); 平均发芽势为 27.2%, 最大值达 73.3%; 半数样本的发芽指数在 29.2%~58.6% 之间, 最大值为 146.7%, 平均发芽指数则为 46.1%; 其平均相对盐害率为 46.7%。参试种质在盐胁迫下各指标的变异系数依次为: 发芽势 (58.0%) > 发芽指数 (53.0%) > 相对盐害率 (40.2%) > 发芽率 (36.4%)。

表 2 NaCl 胁迫下绿豆种质萌发期各参数指标

Table 2 Parameters of mung bean varieties at germination stage under NaCl stress

性状 Trait	25% 百分位数 25% percentile	中位数 Median	75% 百分位数 75% percentile	范围 Range	均值 Mean	变异系数 CV
发芽率 Germination rate/%	40.0	53.3	66.7	0.0 ~ 100.0	52.9	36.4
发芽势 Germination potential/%	16.7	26.7	36.7	0.0 ~ 73.3	27.2	58.0
发芽指数 Germination index/%	29.2	44.4	58.6	0.0 ~ 146.7	46.1	53.0
相对盐害率 Relative salt damage rate/%	33.3	46.7	60.0	0.0 ~ 100.0	46.7	40.2

2.3 不同区域来源绿豆种质的耐盐性评价

2.3.1 不同区域来源绿豆种质在 NaCl 胁迫下的耐盐性指标变异

不同地区因种植气候不同其种质耐盐性存在差异, 盐胁迫下各指标间变异最大的是发芽势, 变幅为 10.0% (非洲)~50.0% (东南亚); 变异最小的是发芽率, 其中东亚区种质的平均发芽率最高 (66.5%), 非洲区种质的平均发芽率最低 (30.0%); 11 个地区的平均相对盐害率在 33.5% (东亚区)~70.0% (非洲区) 之间; 平均发芽指数以东亚区种质最大 (79.3%), 非洲区最小 (20.3%) (表 3)。

国内绿豆资源的平均发芽率的变化在 47.2% (华北区)~57.4% (东北区) 之间; 平均发芽势在 22.9% (华北区)~31.3% (东北区) 之间; 平均发芽指数以东北区 (53.9%) 最高, 其次是西南区 (43.1%) 和东北区 (43.0%), 华北区最低, 为 37.6%; 华北区种质的平均相对盐害率最高, 为 52.3%, 西南区 (48.9%)、华中区 (47.1%)、西北区 (46.9%) 差异较小, 东北区 (42.2%) 较低。

表 3 11 个地区的绿豆种质耐盐性指标变异

Table 3 Salt tolerance traits of mung bean varieties from 11 regions

地区 Region	参试材料数 Number of varieties	参数 Parameters	发芽率 Germination rate/%	发芽势 Germination potential/%	发芽指数 Germination index/%	相对盐害率 Relative salt harm rate/%
中国东北区 Northeast China area	83	Min	3.3	0.0	1.9	0.0
		Max	100.0	73.3	144.7	96.3
		Mean	57.4	31.3	53.9	42.2

中国华北区		Min	3.3	0.0	1.9	16.7
North China area	258	Max	83.3	63.3	91.7	96.3
		Mean	47.2	22.9	37.6	52.3
		Min	0.0	0.0	0.0	0.0
中国华东区	129	Max	100.0	56.7	94.7	100.0
		Mean	47.5	23.9	39.8	51.8
		Min	23.3	3.3	13.1	20.0
中国华南区	16	Max	80.0	50.0	81.9	76.7
		Mean	55.0	23.1	42.1	44.5
		Min	3.3	0.0	3.6	0.0
中国华中区	139	Max	100.0	56.7	93.3	96.3
		Mean	52.3	24.8	41.9	47.1
		Min	16.7	0.0	10.3	16.7
中国西北区	31	Max	83.3	43.3	85.0	81.5
		Mean	53.0	23.0	41.8	46.9
		Min	26.7	3.3	17.8	20.0
中国西南区	20	Max	80.0	53.3	82.5	73.3
		Mean	51.0	26.2	43.1	48.9
		Min	26.7	23.3	27.2	16.7
东南亚	4	Max	83.3	73.3	101.9	73.3
		Mean	65.8	50.0	70.4	34.2
		Min	10.0	6.7	9.2	10.0
东亚区	37	Max	90.0	70.0	135.8	88.9
		Mean	66.5	42.6	79.3	33.5
		Min	23.3	6.7	16.9	10.0
南亚区	51	Max	90.0	60.0	123.9	76.7
		Mean	61.9	35.2	56.5	38.1
		Min	30.0	10.0	20.3	70.0
非洲区	1	Max	30.0	10.0	20.3	70.0
		Mean	30.0	10.0	20.3	70.0
		Min	30.0	10.0	20.3	70.0

2.3.2 不同来源地的绿豆种质在 NaCl 胁迫下的耐盐性指标变异

11 个地区共细分为 34 个来源地，在参试材料数大于 10 份的地区中，南亚区和东亚区的发芽率变异系数均低于 25%（表 4）；华东区的发芽率变异程度最大（ $CV=42.0\%$ ），其中浙江种质以 53.3% 的发芽率最高，台湾种质则以 33.3% 的发芽率最低。在参试材料大于 10 份的来源地中，发芽势最高的为东亚区日本种质（58.9%），最低的则是华中区湖北种质（19.4%）。发芽指数以东北区变异程度最高，变异系数为 52.7%，其中内蒙古种质的发芽指数最高，达 64.6%，河北种质最低，为 35.9%；其次为华东区，变异系数 51.6%，变幅为台湾（16.1%）~江苏（45.5%），其余地区的发芽指数变异系数均小于 50%。相对盐害率的变异系数在不同地区之间差异较小，在参试材料大于 10 份的来源地中，华东区安徽的种质相对盐害率最高（57.4%），南亚区“亚蔬中心”、东北区内蒙古、东亚区日本种质的相对盐害率均低于 40%。

表 4 34 个来源地的绿豆种质耐盐性指标变异

Table 4 Variation of salt tolerance index of mungbean varieties from 34 locations

地区 Region	来源地 Location	参试材料数 Number of varieties	发芽率 Germination rate/%	发芽势 Germination potential/%	发芽指数 Germination index/%	相对盐害率 Relative salt harm rate/%
中国东北区 Northeast China area	黑龙江 Heilongjiang	13	56.7	23.9	44.6	43.0
	吉林 Jilin	48	51.1	26.4	42.7	48.4
	内蒙古 Inner Mongolia	85	63.1	36.9	64.6	36.9
	辽宁 Liaoning	22	50.0	24.4	42.5	49.1
	变异系数 CV			34.0	55.2	52.7
中国华北区 North China area	北京 Beijing	26	48.7	23.3	39.1	50.8
	河北 Hebei	103	45.6	22.2	35.9	53.7

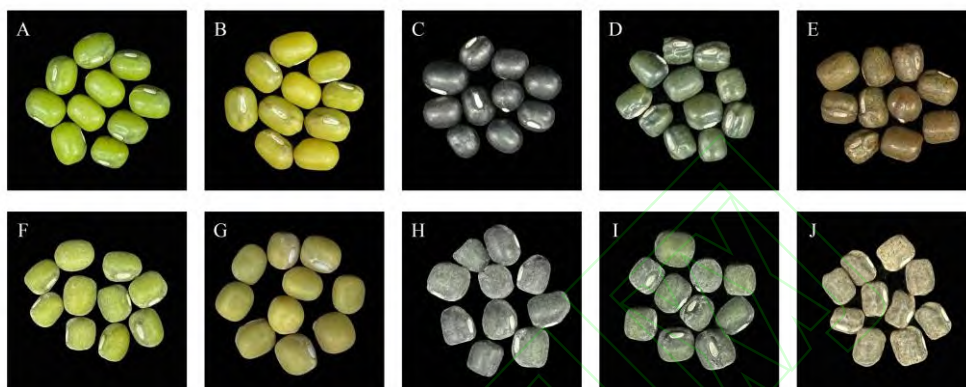
	山西 Shanxi	38	49.8	24.5	40.6	49.9
	天津 Tianjin	6	51.7	23.9	41.3	48.3
	变异系数 CV		39.4	63.2	48.9	35.0
	安徽 Anhui	30	42.2	20.2	34.2	57.4
	江苏 Jiangsu	38	51.4	26.1	45.5	48.4
	江西 Jiangxi	6	49.4	23.3	41.6	49.4
中国华东区 East China area	山东 Shandong	53	47.7	25.0	39.1	51.3
	台湾 Taiwan	1	33.3	0.0	16.1	66.7
	浙江 Zhejiang	1	53.3	26.7	44.4	46.7
	变异系数 CV		42.0	62.5	51.6	37.1
	广东 Guangdong	4	60.0	27.5	46.3	40.0
中国华南区 South China area	广西 Guangxi	5	62.0	32.7	52.7	36.4
	海南 Hainan	7	47.1	13.8	32.0	52.9
	变异系数 CV		31.6	61.0	41.8	40.3
	河南 Henan	77	54.5	27.0	44.3	45.2
中国华中区 Central China area	湖北 Hubei	46	46.7	19.4	35.7	52.1
	湖南 Hunan	16	57.9	29.2	48.1	41.4
	变异系数 CV		34.1	56.0	43.0	36.7
	甘肃 Gansu	6	45.0	12.8	27.5	54.7
中国西北区 Northwest China area	宁夏 Ningxia	5	56.7	24.0	47.7	43.3
	陕西 Shaanxi	16	52.7	26.5	44.7	47.3
	新疆 Xinjiang	4	61.7	23.3	43.8	38.3
	变异系数 CV		33.3	56.3	46.5	37.3
	重庆 Chongqing	5	45.3	24.0	38.7	54.7
中国西南区 Southwest China area	云南 Yunnan	1	53.3	40.0	50.0	46.7
	贵州 Guizhou	6	52.2	24.4	42.3	47.8
	四川 Sichuan	8	53.3	27.1	45.5	46.3
	变异系数 CV		29.5	53.9	39.1	30.4
南亚区 South Asia area	亚蔬中心 World vegetable center	49	62.8	35.8	57.3	37.2
	印度 India	2	40.0	20.0	36.7	60.0
	变异系数 CV		24.4	32.5	34.8	39.6
东南亚区 Southeast Asia area	菲律宾 The Philippine	3	78.9	58.9	84.7	21.1
	泰国 Thailand	1	26.7	23.3	27.2	73.3
	变异系数 CV		40.0	45.2	46.7	77.0
东亚区 East Asia area	日本 Japan	37	66.5	42.6	79.3	33.5
	变异系数 CV		24.1	34.0	43.1	47.5
非洲区 African area	马达加斯加 Madagascar	1	30.0	10.0	20.3	70.0
	变异系数 CV		0.0	0.0	0.0	0.0

2.4 不同种皮性状绿豆种质的耐盐性

2.4.1 不同种皮颜色的绿豆种质的耐盐性差异

769 份绿豆种质共分为 5 种种皮颜色（图 2）。褐色种皮的籽粒发芽率（28.4%）极显著低于黑色、黄色和绿色籽粒（图 3），墨绿种皮的籽粒变异程度最大（ $CV=79.6\%$ ），黄色种皮的籽粒以 60.2% 的发芽率表现最佳；发芽势以黄色种皮的籽粒（29.8%）和绿色种皮的籽粒（28.1%）较高，黄色种皮的籽粒变异程

度更小 ($CV=46.3\%$)，绿色种皮的籽粒群体的极值差异较大，褐色种皮的籽粒较绿色和黄色种皮的籽粒的发芽势有极显著降低 (13.94%)；褐色种皮的籽粒的发芽指数为 23.22% ，较黄色 (53.15%) 和绿色籽粒 (47.10%) 有极显著降低，其余粒色群体并无显著性差异；黑色、黄色和绿色种皮的籽粒相对盐害率较低且相互之间无明显差异，褐色和墨绿色种皮的籽粒相对盐害率有显著增高，但褐色种皮的籽粒变异程度较低 ($CV=30.7\%$)，墨绿色种皮的籽粒中有少数种质受盐害影响较大。

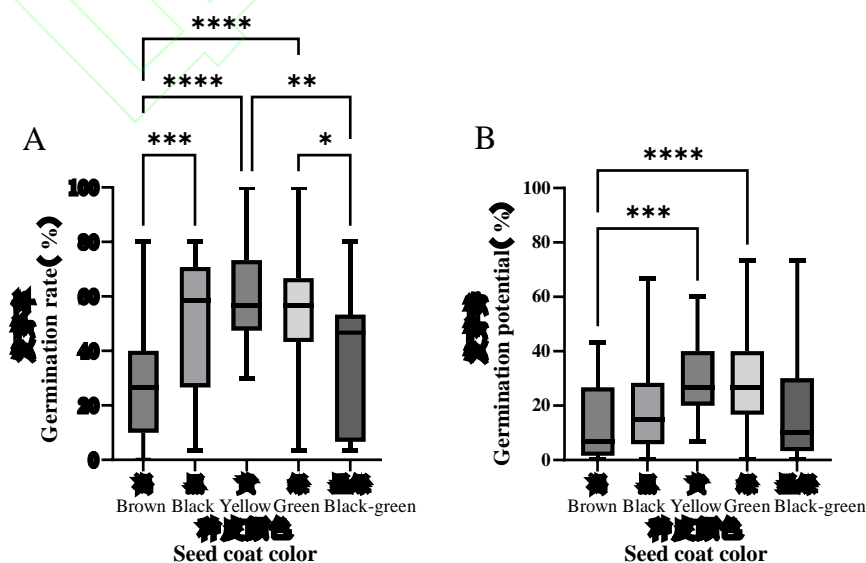


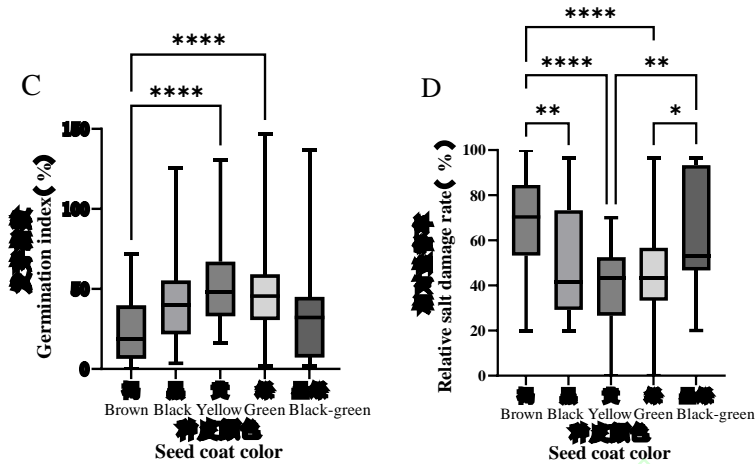
A: 绿色明面种子; B: 黄色明面种子; C: 黑色明面种子; D: 墨绿色明面种子; E: 褐色明面种子; F: 绿色毛面种子; G: 黄色毛面种子; H: 黑色毛面种子; I: 墨绿色毛面种子; J: 褐色毛面种子

A: Shiny green seed; B: Shiny yellow seed; C: Shiny black seed; D: Shiny black-green seed; E: Shiny brown seed; F: Dull green seed; G: Dull yellow seed; H: Dull black seed; I: Dull black-green seed; J: Dull brown seed

图 2 不同种皮性状的绿豆种质

Fig.2 Mung bean germplasm with different seed coat traits





*: 在 $P < 0.05$ 水平上显著相关, **,***和****: 在 $P < 0.01$, $P < 0.001$ 和 $P < 0.0001$ 水平上极显著相关

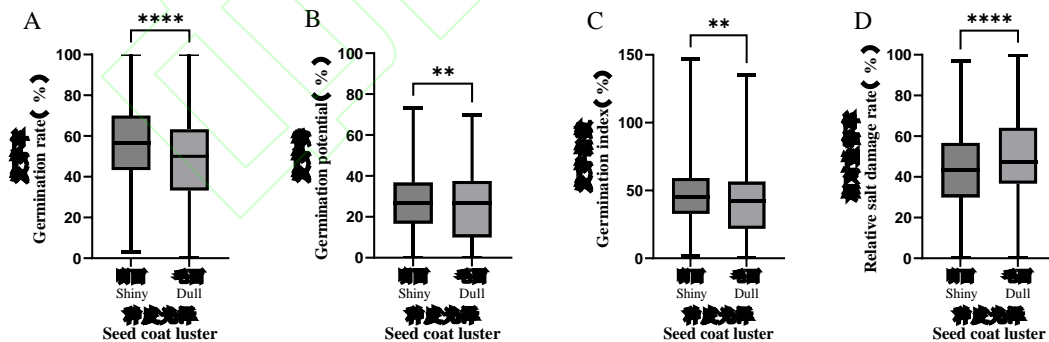
*: the correlation was significant at the $P < 0.05$ level, **, *** and ****: highly significant correlations at the $P < 0.01$, $P < 0.001$ and $P < 0.0001$ levels, respectively

图 3 NaCl 胁迫下不同种皮颜色的绿豆种质萌发期各参数指标

Fig.3 Parameters of mung bean germplasm with different seed coat colors at germination stage under sodium chloride stress

2. 4. 2 不同种皮光泽的绿豆种质间的耐盐性差异

769 份绿豆种质中种皮色泽为明面的种质共计 507 份, 毛面 262 份 (图 2)。不同种皮光泽的绿豆种质耐盐性有明显差异 (图 4), 明面种质发芽率为 55.4%, 毛面种质则为 48.1%, 在盐胁迫下明面种质各指标均较毛面种质表现优异; 明面种质在发芽率、发芽势、发芽指数的变异程度均较毛面种质更小, 但两类种质相对盐害率的变异系数均在 39%~40%之间。



*: 在 $P < 0.05$ 水平上显著相关, **,***和****: 在 $P < 0.01$, $P < 0.001$ 和 $P < 0.0001$ 水平上极显著相关

*: the correlation was significant at the $P < 0.05$ level, **, *** and ****: highly significant correlations at the $P < 0.01$, $P < 0.001$ and $P < 0.0001$ levels, respectively

图 4 NaCl 胁迫下不同种皮光泽的绿豆种质萌发期各参数指标

Fig.4 Parameters of mung bean germplasm with different seed coat lusters at germination stage under NaCl solution stress

2.5 不同籽粒大小的绿豆种质的耐盐性

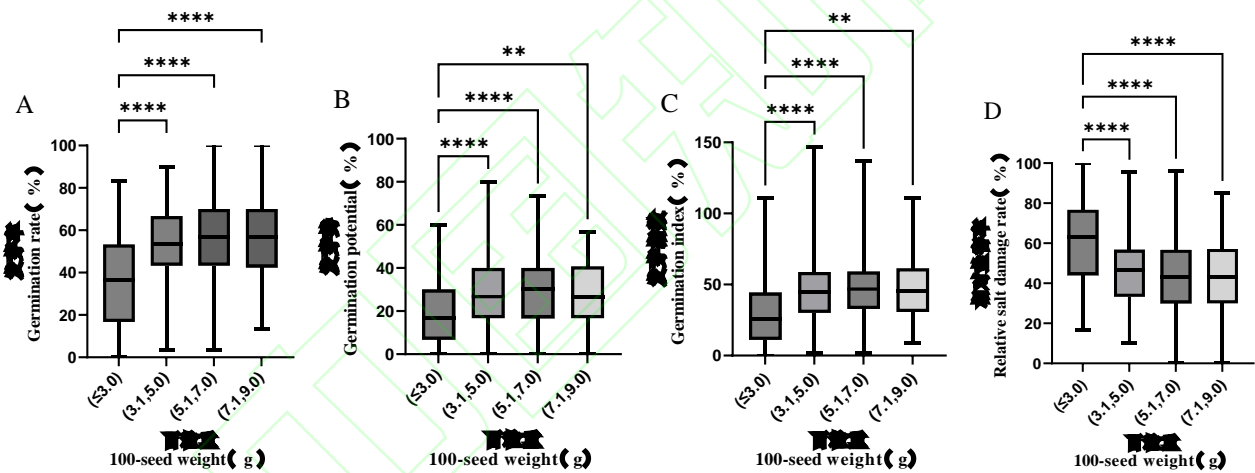
经分析得出，绿豆种质的籽粒大小与其耐盐性状（发芽率、发芽势、发芽指数、相对盐害率）均有极显著相关性（表 5）。769 份绿豆种质按其百粒重大小划分为 4 个群体（图 5），其中百粒重小于 3g 的绿豆种质发芽率的变异程度较高（ $CV=59.8\%$ ），且耐盐性与百粒重 3g 及以上的绿豆种质有极显著差异性，其发芽率（35.9%）、发芽势（18.7%）、发芽指数（31.3%）均极显著降低，相对盐害率（62.4%）则极显著增高。

表 5 绿豆种质百粒重与盐胁迫下各性状的相关性分析

Table 5 Correlation analysis between 100-seed weight of mung bean germplasm and various traits under salt stress

		发芽率 GR	发芽势 GP	发芽指数 GI	相对盐害率 Relative salt damage rate
百粒重	Pearson 相关性	0.235**	0.146**	0.157**	-0.227**
100-seed weight	显著性（双侧）	.000	.000	.000	.000

“*”： $P<0.05$ ，“**”： $P<0.01$



*: 在 $P < 0.05$ 水平上显著相关, **,***和****: 在 $P < 0.01$, $P < 0.001$ 和 $P < 0.0001$ 水平上极显著相关

*: the correlation was significant at the $P < 0.05$ level, **, *** and ****: highly significant correlations at the $P < 0.01$, $P < 0.001$ and $P < 0.0001$ levels,

respectively

图 5 NaCl 胁迫下不同百粒重的绿豆种质萌发期各参数指标

Fig.5 Parameters of mung bean germplasm with different hundred-grain weight at germination stage under NaCl stress

3 讨论

作为小作物，绿豆种植难以与大宗作物直接竞争土地资源，因此积极利用边际土壤或盐碱地等是绿豆产业发展的重要趋势。前人研究表明绿豆是耐盐性较强的作物^[11,15]，周红菊^[21]用不同浓度 NaCl 溶液对 4 种作物的萌发期鉴定发现盐胁迫对发芽率的影响程度由小到大分别为绿豆、小麦、玉米、大豆；芦站根^[22]

分析发现与小豆、大豆相比，绿豆耐盐性最强。因此，筛选绿豆耐盐种质是盐渍土壤利用的切实可行的发展途径。

植物萌发阶段耐盐性的强弱对于在盐渍土上的生存与生长具有决定性意义，室内耐盐鉴定可快速发掘耐盐种质。目前已有不少关于绿豆萌发期最适筛选盐浓度的报道，李小雷等^[23]和王乐政等^[24]先后筛选到绿豆萌发期鉴定最佳 NaCl 浓度分别为 1.0% 和 1.2%；时会影等^[25]则发现 0.8% NaCl 胁迫下，绿豆种质间各生长指标的差异最为明显，故认为 0.8% NaCl 为最佳筛选浓度。上述差异可能是由于研究材料的来源地和群体大小不同所致。本研究参试材料较多，通过随机挑选 4 份绿豆种质的预实验，选定各盐害指标平均值为 50% 时的盐浓度为最佳筛选浓度（1.2% NaCl）^[20]，与王乐政等^[24]结果一致。该浓度盐胁迫下，李小雷等^[23]的 19 份绿豆种质平均发芽率为 35.9%，而王乐政等^[24]的 14 份绿豆种质的平均发芽率为 72.6%。不同学者的试验结果有较大差异可能是因为参试材料数量不同，不同材料间耐盐性差异的影响较为明显^[23]。若耐盐性弱的种质占比较多，则平均发芽率偏低，确立的最适筛选浓度也会偏低；反之，则会偏高^[26]。本研究中 769 份绿豆种质的平均发芽率为 52.9%，盐害指数为 46.7%；其中 50% 的种质发芽率在 40.0%~66.7% 之间，与预实验结果基本相符，所以本试验结果具有一定可靠性。

在 1.2% NaCl 胁迫下，李小雷等^[23]筛选出的 4 份高耐盐绿豆品种相对发芽率在 40%~52% 之间，本试验中相对发芽率大于 60% 的种质共 332 份；王乐政等^[24]筛选出的 3 份高耐盐品种相对发芽指数在 57%~74% 之间，本试验筛选出 175 份种质相对发芽指数高于 60%。同时试验各指标中发芽势的变异程度最大（58.0%），1.0% NaCl 处理下的苜蓿萌发期发芽势变异系数均大于 50%^[27]，说明植物萌发期的发芽势对盐胁迫的影响相对敏感。不同地区间绿豆种质萌发期耐盐性存在显著差异，可能与不同种源所在地的土壤盐分类型不同有关^[28]，试验选用氯化盐溶液为筛选溶液，与内蒙古盐碱地主要盐分类型相同，国内内蒙古以 63.1% 的发芽率表现最佳；国外东亚区的日本本土盐碱地同样是以氯化物为主的滨海盐碱地，其在发芽率（66.5%）和发芽指数（79.3%）上均表现优异。不同种皮性状的绿豆种质耐盐性有明显差异，褐色籽粒的耐盐性显著弱于黄色和绿色籽粒，明面种质在各指标上均优于毛面种质，目前未见基于绿豆种皮色泽开展种子活力评价相关报道。但在豆科其他植物中，研究发现蚕豆种子色泽的差异是因为种子成熟度的不同，种子成熟度是影响种子活力的重要因素^[29]，亮橄榄绿色的紫花苜蓿种子活力要显著高于干褐色种子^[30]，另有学者提出应用种子颜色评判种子活力应该综合考虑多因素的影响^[31]。绿豆种质的百粒重也是影响其耐盐性的重要因素之一，本试验发现百粒重小于 3g 的绿豆种质在盐胁迫下萌发活力较差，梅丽等^[32]同样发现百粒重与发芽势及发芽率呈极显著正相关。

本研究中 769 份绿豆种质在盐胁迫下平均发芽率大于 90%、平均发芽势大于 50%、平均发芽指数大于 80% 的种质共四份，分别为 C1234（山东）、C1555（河南）、内蒙绿 4-4、JP240343（日本）。

目前绿豆的耐盐性评价多集中于育成品种，且参试材料数量相对较少，本试验中的 769 份绿豆种质占国家作物种质库绿豆库存资源总量的 10% 以上，可为今后绿豆种质的耐盐性鉴定研究与实地利用提供理论和实践依据。

4 结论

本研究认为使用 NaCl 溶液作为绿豆种质耐盐性鉴定的最适浓度为 1.2%，试验发现绿豆种质的平均发芽率、发芽势、发芽指数、相对盐害率分别为 52.9%、27.2%、46.1%、46.7%，不同指标间变异程度最大的是发芽势；各地区中以东亚区的平均发芽率最高（66.5%），国内则是东北区最高（57.4%）；不同种皮性状的种质耐盐性有较为明显的差异，其中褐色种皮的籽粒耐盐性较差，明面色泽的籽粒耐盐性优于毛面；种子大小同样与绿豆耐盐性显著相关，百粒重小于 3g 的绿豆种质相对盐害率有明显增高。

参考文献

- [1] 王遵亲. 中国盐渍土. 北京: 科学出版社, 1993
Wang Z Q. Salt-affected soils of China. Beijing: Science Press, 1993
- [2] 陆宝金, 田生昌, 左忠, 杨英, 张祯. 盐渍化土地可持续利用研究综述及展望. 宁夏大学学报: 自然科学版, 2023, 44(1): 79-88
Lu B J, Tian S C, Zuo Z, Yang Y, Zhang Z. Review and prospect on sustainable utilization of salinized land. Journal of Ningxia University: Natural Science Edition, 2023, 44(1): 79-88
- [3] Wicke B, Smeets E, Dornburg V, Vashev B, Gaiser T, Turkenburg W, Faaij A. The global technical and economic potential of bioenergy from salt-affected soils. Energy and Environmental Science, 2011, 4: 2669-2681
- [4] Jan A, Osman M B, Amanullah. Response of chickpea to nitrogen sources under salinity stress. Journal of Plant Nutrition, 2013, 36(9): 1373-1382
- [5] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望. 土壤学报, 2008, 45(5): 837-845
Yang J S. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 837-845
- [6] 杨劲松, 姚荣江. 我国盐碱地的治理与农业高效利用. 中国科学院院刊, 2015, 30(S): 162-170
Yang J S, Yao R J. Management and efficient agricultural utilization of salt-affected soil in China. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2015, 30(S): 162-170
- [7] 王明泉, 李春霞, 龚士琛, 闫淑琴, 李国良, 扈光辉, 苏俊, 任洪雷, 杨剑飞, 张翼飞, 杨克军. 玉米自交系苗期耐盐性鉴定及筛选研究. 中国农学通报, 2018, 34(12): 30-35
Wang M Q, Li C X, Gong S C, Yan S Q, Li G L, Hu G H, Su J, Ren H L, Yang J F, Zhang Y F, Yang K J. Salt-tolerance identification and screening of maize inbred lines at seedling stage. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(12): 30-35
- [8] Takehisa H, Shimodate T, Fukuta Y, Ueda T, Yano M, Yamaya T, Kameya T, Sato T. Identification of quantitative trait loci for plant growth of rice in paddy field flooded with salt water. Field Crops Research, 2004, 89(1): 85-95

- [9] 姜奇彦,胡正,张辉,王萌萌,唐俊源,倪志勇,姜锋. 大豆种质资源耐盐性鉴定与研究. 植物遗传资源学报, 2012, 13 (5) :726-732
- Jiang Q Y,Hu Z,Zhang H,Wang M M,Tang J Y,Ni Z Y,Jiang F. Evaluation for salt tolerance in soybean cultivars(*Glycine max* L.Merrill). Journal of Plant Genetic Resources, 2012, 13 (5) :726-732
- [10] 孙璐,周宇飞,汪澈,肖木辑,陶冶,许文娟,黄瑞东. 高粱品种萌发期耐盐性筛选与鉴定. 中国农业科学,2012,45(9) :1714-1722
- Sun L,Zhou Y F,Wang C,Xiao M J,Tao Y,Xu W J,Huang R D. Screening and identification of sorghum cultivars for salinity tolerance during germination. Scientia Agricultura Sinica, 2012,45(9):1714-1722
- [11] 时会影,范保杰,刘长友,王彦,王坤,张志肖,苏秋竹,沈颖超,田静. 绿豆耐盐性研究进展. 植物遗传资源学报,2022,23(6) :1594-1603
- Shi H Y,Fan B J,Liu C Y,Wang Y,Wang K,Zhang Z X,Su Q Z,Shen Y C,Tian J. Research progress of salt tolerance in mung bean(*Vigna radiata* L.) . Journal of Plant Genetic Resources, 2022,23(6):1594-1603
- [12] 田静,程须珍,范保杰,王丽侠,刘建军,刘长友,王素华,曹志敏,陈红霖,王彦,王坤. 我国绿豆品种现状及发展趋势. 作物杂志,2021(6) :15-21
- Tian J,Cheng X Z,Fan B J,Wang L X,Liu J J,Liu C Y,Wang S H,Cao Z M,Chen H L,Wang Y,Wang K. Current situation and development trend of mung bean varieties in China. Crops, 2021(6):15-21
- [13] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农业统计资料(1949-2019). 北京: 中国统计出版社, 2020
- Rural Social and Economic Survey Department of the National Bureau of Statistics. China agricultural statistical data (1949-2019) .BeiJing: China Statistics Press,2020
- [14] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2020
- Rural Social and Economic Survey Department of the National Bureau of Statistics. China rural statistical yearbook. BeiJing: China Statistics Press,2020
- [15] 张秀玲. 盐胁迫对绿豆种子萌发的影响. 北方园艺,2008(4) :52-53
- Zhang X L. Effects of salt stress on seeds germination of *Vigna radiata*. Northern Horticulture, 2008(4):52-53
- [16] Hosseini M K, Powell A A, Bingham I J. Comparison of the seed germination and early seedling growth of soybean in saline conditions. Seed Science Research, 2002, 12: 165-172
- [17] 王维. 小麦耐盐种质的筛选鉴定及利用. 山东: 山东农业大学,2021
- Wang W. Screening, Identification and utilization of salt-tolerant wheat germplasm. ShanDong:Shandong Agricultural University, 2021
- [18] 王丽侠,程须珍,王素华. 绿豆种质资源、育种及遗传研究进展. 中国农业科学,2009,42(5) :1519-1527
- Wang L X,Cheng X Z,Wang S H. Advances in research on genetic resources, breeding and genetics of mung bean(*Vigna radiata* L.). Scientia Agricultura Sinica, 2009,42(5):1519-1527
- [19] 徐恒恒,黎妮,刘树君,王伟青,王伟平,张红,程红焱,宋松泉. 种子萌发及其调控的研究进展. 作物学报, 2014, 40(07) : 1141 - 1156
- Xu H H,Li N,Liu S J,Wang W Q,Wang W P,Zhang H,Cheng H Y,Song S Q. Research progress in seed germination and its control. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(07): 1141-1156
- [20] Wu H,Guo J R,Wang C F,Li K L,Zhang X W,Yang Z,Li M T,Wang B S. An effective screening method and a reliable screening trait for

salt tolerance of *Brassica napus* at the germination stage. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 530

- [21] 周红菊. NaCl 对作物种子发芽率的影响研究. *现代农村科技*, 2011 (16) : 69
- Zhou H J. Study on the effect of NaCl on the germination rate of crop seeds. *Modern Rural Technology*, 2011(16):69
- [22] 芦站根. 盐渍条件下三种豆类抗盐性的隶属函数值评价. *北方园艺*, 2011 (19) : 40-41
- Lu Z G. Evaluation of salt resistance of three species beans with subordinate function value method under saline condition. *Northern Horticulture*, 2011(19): 40-41
- [23] 李小雷,何瑞超,贾学宇,王雪,鲍红春,吴小燕,于卓. 19 份绿豆种子萌发期耐盐性鉴定与评价. *种子*, 2022, 41 (5) : 109-115
- Li X L, He R C, Jia X Y, Wang X, Bao H C, Wu X Y, Yu Z. Evaluation and identification of 19 mung bean seeds for salt tolerance during germination. *Seed*, 2022, 41(5):109-115
- [24] 王乐政,高凤菊,华方静,曹鹏鹏. 不同绿豆品种萌发期耐盐性研究. *山东农业科学*, 2015, 47 (9) : 31-35
- Wang L Z, Gao F J, Hua F J, Cao P P. Study on salt tolerance of different mung bean varieties at germination stage. *Shandong Agricultural Sciences*, 2015, 47(9):31-35
- [25] 时会影,范保杰,刘长友,王彦,王坤,张志肖,苏秋竹,田静. 绿豆种质资源萌发期耐盐性鉴定与评价. *作物杂志*, 2024, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1808.S.20240401.0958.002.html>
- Shi H Y, Fan B J, Liu C Y, Wang Y, Wang K, Zhang Z X, Su Q Z, Tian J. Identification and evaluation of salt tolerance germplasm of mung bean during germination. *Crops*, 2024, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1808.S.20240401.0958.002.html>
- [26] 张瑞,王洋,Shahid Hussain,刘永昊,邵星宇,杨硕,陈英龙,韦还和,戴其根. 水培条件下水稻全生育期耐盐筛选鉴定. *植物遗传资源学报*, 2021, 22 (6) : 1567-1581
- Zhang R, Wang Y, Hussain S, Liu Y H, Shao X Y, Yang S, Chen Y L, Wei H H, Dai Q G. Identification of salt-tolerant rice cultivars in the growth period under hydroponic conditions. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2021, 22(6):1567-1581
- [27] 韩清芳,李崇巍,贾志宽. 不同苜蓿品种种子萌发期耐盐性的研究. *西北植物学报*, 2003 (4) : 597-602
- Han Q F, Li C W, Jia Z K. The study on salt tolerance of different alfalfa varieties in germinating period. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2003(4):597-602
- [28] 李媛,李志辉,苗晓娟,王智,王军辉,麻文俊. 梓树 6 个种源耐盐性差异的生物测定. *林业科学研究*, 2019, 32 (6) : 106-114
- Li Y, Li Z H, Miao X J, Wang Z, Wang J H, Ma W J. Bioassay for salt tolerance of six catalpa ovata provenances. *Forest Research*, 2019, 32(6):106-114
- [29] Yang W, Mu C S, Hou Y, Li X. Optimum harvest time of *Vicia cracca* in relation to high seed quality during pod development. *Crop Science*, 2008, 48 (2) : 709-715
- [30] Stewart G, Carlson J W. The quality of alfalfa seed as affected by color and plumpness. *Agronomy Journal*, 1932, 24 (2) : 146-155
- [31] Stanisavljevi R, Veljic N, Trbanovi R, Poti D, Aleksic G, Trkulja N, Kneevi J, Dodig D. Seed quality of vetch (*Vicia sativa*) affected by different seed colors and sizes after various storage periods. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2018, 20 (12) : 2655-2660

[32] 梅丽,程须珍,刘春吉,王素华,王丽侠,刘长友,孙蕾,徐宁. 绿豆种子休眠性和百粒重的 QTLs 和互作分析. 植物遗传资源学报,2011,12(1):96-102

Mei L,Cheng X Z,Liu C J,Wang S H, Wang L X,Liu C Y,Sun L,Xu N. QTL Mapping and interaction analysis for seed dormancy and seed weight of mung bean. Journal of Plant Genetic Resources, 2011,12(1):96-102

