

286份甘蓝型油菜种质苗期耐盐碱性综合评价

薛天源¹, 鲁金春子¹, 何思晓¹, 余忆¹, 陈敬东¹, 文静², 沈金雄²,
傅廷栋², 曾长立¹, 万何平¹

¹江汉大学生命科学学院/湖北省汉江流域特色生物资源保护开发与利用工程技术研究中心, 武汉 430056;

²华中农业大学植物科学技术学院/国家油菜工程技术研究中心, 湖北武汉 430070)

摘要: 苗期是油菜植株形态建成的重要阶段, 盐碱胁迫是影响其苗期形态的主要因素之一, 因此筛选出苗期过程中耐盐碱种质对油菜育种及理论研究具有重要意义。本研究对 286 份甘蓝型油菜品系进行苗期耐盐碱性鉴定, 通过水培试验, 测定盐碱胁迫处理下叶片数、绿叶数、绿叶比、株高、根长、根重等指标, 通过盐碱胁迫综合评价(D值)、极端材料筛选分析、相关性、主成分、隶属函数、频数分析和逐步回归分析法, 对不同基因型苗期油菜种质建立耐盐碱性综合评价模型并筛选出适宜的评价鉴定指标。盐碱胁迫下, 除叶片数与株高相关系数未达到显著性, 叶片数与株高、绿叶数呈负相关, 其它性状之间均呈现正相关并达到了显著或极显著水平。利用主成分分析法将 7 个耐盐碱指标综合成为 4 个主成分, 可代表油菜耐盐碱性 88.349% 的原始数据信息量。依据 4 个主成分的相对重要性(权重)进行加权, 得到不同基因型的耐盐碱性综合评价(D值)。结合隶属函数分析和极端材料筛选分析, 筛选出 4 份耐碱盐的甘蓝型油菜种质和 4 份盐碱敏感种质。通过逐步回归分析结果认为, 在油菜苗期测定其绿叶数、绿叶比、地上重、根长和根重, 通过回归方程估算其 D 值, 可以初步判断甘蓝型油菜种质资源耐盐碱性。

关键词: 甘蓝型油菜; 苗期; 盐碱胁迫; 种质资源筛选; 综合评价

Comprehensive Evaluation of 286 Accessions of *Brassica Napus* Germplasm at Seedling Stage

XUE Tianyuan¹, LU Jinchunzi¹, HE Sixiao¹, YU Yi¹, CHEN Jingdong¹, WEN Jing², SHEN Jinxiong²,
FU Tingdong², ZENG Changli¹, WAN Heping¹

¹ College of Life Sciences, Jiangnan University/Hubei Engineering Research Center for Conservation, Development and Utilization of Characteristic Biological Resources in Hanjiang River Basin, Wuhan 430056; ² College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University/National Oilseed Rape Engineering Technology Research Center, Wuhan 430070)

Abstract: Seedling stage is of importance in the morphology of rapeseed plants, whereas salinity stress is one of the main factors affecting its seedling morphology. Screening out salinity-tolerant germplasm in the seedling process is of great significance in rapeseed breeding and theoretical research. In this study, 286 kale-type *Brassica napus* lines were tested for salinity tolerance during the seedling stage, and traits including the number of leaves, green leaves, green leaf ratio, plant height, root length, root weight and other indexes were determined under hydroponic salinity stress treatments. Statistics were conducted by the comprehensive evaluation value of saline and alkali stress (D-value), screening analysis of extreme materials, correlation, principal component, subordinate function, frequency number analysis and stepwise regression analysis. A comprehensive evaluation model of salinity tolerance was established for different genotypes of seedling oilseed rape germplasm and suitable evaluation and identification indexes were screened out. The correlation coefficients between the number of leaves and plant height were not significant, and the number of leaves was negatively correlated with the plant height and the number of green leaves under saline and alkaline stress. The correlation coefficients in the number of leaves and the number of green leaves were negatively correlated with the number of green leaves. The seven salinity tolerance indexes were stimulated into four principal components using principal component analysis, which could represent 88.349%

第一作者主要从事特色植物资源开发与利用研究, E-mail: xty99100911@163.com

通信作者: 曾长立, 主要从事植物逆境生理、珍稀濒危植物保护与利用研究, E-mail: zengchangli@jhun.edu.cn

万何平, 主要从事油菜耐盐碱遗传研究, E-mail: wanheping@jhun.edu.cn

¹ 基金项目: 生物育种专项(2022ZD04010); 国家自然科学基金(U22A20469); 国家重点研发计划项目(2016YFD0100202-25)

Foundation projects: Biological Breeding Special (2022ZD04010), The National Natural Science Foundation of China (U22A20469); The National Key Research and Development Program (2016YFD0100202-25).

of the original data information of salinity tolerance. Based on the relative importance (weight) of the four principal components, the combined salinity tolerance evaluation value (D value) of different genotypes was obtained. Combined with affiliation function analysis and extreme material screening analysis, four alkali-resistant kale-type oilseed rape germplasm and four saline-sensitive germplasm were screened out. The results of stepwise regression analysis showed that the salinity tolerance of kale-type oilseed rape germplasm resources could be preliminarily determined by measuring the number of green leaves, green leaf ratio, above-ground weight, root length and root weight at the seedling stage, and then estimating the D-value of the germplasm resources through regression equations.

Keywords: *Brassica napus*; Seedling stage; Saline-alkali stress; Screening of germplasm resources; Comprehensive evaluation

土壤盐碱化是影响农作物栽培和生产的重要因素之一，中国有约 15 亿亩盐碱地，其中约 5 亿亩具有开发利用潜力^[1,2]。2023 年，习近平总书记在河北沧州考察时指出，“要立足我国盐碱地多、开发潜力大的实际，发挥科技创新的关键作用，加大盐碱地改造提升力度，加强适宜盐碱地作物品种开发推广，有效拓展适宜作物播种面积，积极发展深加工，做好盐碱地特色农业这篇大文章”。盐碱地是我国耕地“扩容、提质、增效”的重要来源，是农业开发利用的后备土地资源^[3]。因此，盐碱地亟待整治开发利用^[4]。盐碱地的开发利用，作为一项技术性难题长期以来备受关注。目前，利用植被修复为主的生物措施已成为改良盐碱地的重要手段，具有成本低、收益快、对环境友好等优点^[5]。有研究表明，苗期油菜对盐分中度敏感，对盐分的抗性相对较差^[6-7]，其在盐碱胁迫下株高、干物质积累量、根系生长等生长指标受到显著抑制^[8]，适宜作为油菜耐盐碱研究的重要时期。李琳^[9]等研究 46 份芸豆品种苗期生长的耐盐碱性表明，100 mmol·L⁻¹NaHCO₃ (pH=8.5) 为适宜的胁迫处理浓度。以各项指标的耐盐碱系数为耐盐碱指标,通过主成分分析、隶属函数分析和聚类分析等方法对 42 份芸豆品种苗期的耐盐碱性进行综合评价。张林^[10]等研究 50 份玉米自交系苗期表型性状的耐盐碱性表明，200mmol·L⁻¹ NaCl+5 mmol·L⁻¹ Na₂CO₃ 混合浓度是适宜的耐盐碱性鉴定胁迫浓度。王晓春^[11]发现不同浓度的盐碱溶液处理降低紫花苜蓿苗期株高、根长、根粗、地上重、地下重。赵俊香^[12]等对 16 份菊芋的耐盐碱能力进行评价经盐碱胁迫后,地上鲜干重、地下鲜干重、全株鲜重和全株干重均受到不同程度的影响。可见盐碱胁迫是苗期形态建成主要限制因素^[13-15]，因此,选育苗期耐盐碱的作物品种（系）是实现高产、提高品种稳定性的关键。

油菜是全球重要的油料作物之一，主要分布在南方酸性土壤的长江中下游流域，在中国扮演着第五大作物的角色，仅次于水稻、小麦、玉米和大豆。菜籽油产量约占中国自产植物油总量的 45%以上^[16,17]。油菜适种范围广，在我国从南到北都有种植，研究表明油菜是中度耐盐作物^[18]，无论是中性盐胁迫（主要含 NaCl），盐碱混合胁迫（主要含 Na₂SO₄、Na₂CO₃），碱性盐胁迫（主要含 Na₂CO₃、NaHCO₃），油菜均表现出一定程度的耐受性^[19]。此外，油菜生物学产量高、耐盐碱能力强、适种区域广等优点^[20]使其成为开发和利用盐碱土地的理想植物材料。因此，为了降低和预防盐碱胁迫对油菜的危害，最有效的方法是筛选和培育耐盐碱油菜种质。耐盐碱特征筛选和评价是耐盐碱育种的基础。目前，盐碱胁迫对油菜生长的影响及耐盐碱种质的筛选鉴定引起广泛重视。多年来，人们对油菜的耐盐碱性进行了大量的研究，张培通^[21]等以宁杂 21 号含盐量为 0.2% ~ 0.4% 的盐碱地试验田进行播种，全生育期收获，以株高、单株产量、叶面积等性状作为耐盐高产栽培的生育指标；杨洋^[22]等以华油杂 62 号油菜为试材，采用盆栽方法，研究了轻、中、重度复合盐碱胁迫下油菜幼苗叶片生理指标可溶性糖、脯氨酸含量、超氧化物歧化酶（SOD）、过氧化物酶（POD）活性、过氧化氢酶（CAT）的活性变化；李班^[23]等以华油杂 62 号油菜为试验材料，对油菜种子及幼苗进行不同浓度的复合盐、复合碱及复合盐碱溶液处理，测定油菜种子的发芽率以及甘蓝型油菜叶片中叶绿素含量、脯氨酸含量、可溶性糖含量、抗氧化酶活性等生理指标，以高效液相色谱法测定油菜叶片中甜菜碱积累量。前人的研究都是根据油菜种子萌发期或成熟期相关指标对油菜耐盐碱性进行鉴定，但根据苗期相关性状进行油菜耐盐碱种质资源筛选却报道较少。耐盐碱性是一个复杂的性状，某一单项指标对盐碱胁迫的反应不尽相同，不同耐盐碱类型间的耐性机制也不相同。而利用主成分分析法可以准确地确定各指标权重，从多个存在一定相关关系的变量中选出几个新的综合变量。在此基础上，求出所有品种的每一个综合指标值及其相应的隶属函数值，然后进行加权，得到各品种抗逆性的综合评价价值，从而科学

地评价各作物品种的抗逆性, 吴鹏博^[8]等研究了出苗率、茎粗、植株鲜重、根干重等 8 个指标对苗期油菜耐盐碱性进行综合评价; 李萍^[24]等以发芽势、发芽率、根长、芽长、相对芽长、相对根长作为耐盐性相关指标, 对 146 份甘蓝型油菜品种进行芽期耐盐性鉴定。因此, 利用单项指标鉴定作物的耐盐碱性局限性很大。本文以 286 份甘蓝型油菜品种(系)为材料采用水培法在苗期过程进行盐碱胁迫处理, 调查 7 个指标, 运用主成分分析、隶属函数、频次分析、极端材料筛选分析和逐步回归分析等综合评价油菜品种(系)苗期耐盐碱性, 筛选出苗期对耐盐碱性较强的甘蓝型油菜种质, 以期建立耐盐碱性筛选、鉴定指标及评价方法, 为油菜耐盐碱品种(系)选择和新品种(系)选育提供参考依据和理论支持。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验材料为 286 份油菜地方品种、育种材料和栽培品种, 由华中农业大学、中国农科院油料所、江苏省农科院、西南大学、湖南农业大学、四川省农科院、陕西杂交油菜中心和青海大学等多家单位提供。见表 1。

1.2 苗期水培处理

依托江汉大学汉江流域生物资源保护开发与利用工程中心构建的油菜水培系统, 温度控制为 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 流程(流程 1~4 参考万何平等^[25])主要包括: 播种—移栽—培养—盐碱胁迫处理—观察取样及数据测定。其中待胁迫第 14 天对油菜苗进行指标鉴定, 指标有叶片数(Leave number)、绿叶数(Green leave number)、绿叶比(Green leave rate)、株高(Shoot length)、地上重(Shoot weight)、根长(Root length)、根重(Root weight)。

材料收获后, 取地下部根系, 用爱普生(Perfection V850Pro)对甘蓝型油菜根系进行扫描, 获得根长(RL)。地上重(SW)和根重(RW)使用电子天平进行称量, 株高(SL)使用直尺测量, 记录油菜叶片数; 完全展开的叶片只有留绿性状且不存在黄化, 即视为绿叶。

1.3 数据处理与分析

利用 Microsoft Excel 2010 处理原始数据并作相关图表, 运用 SPSS 19.0 对处理后的数据进行方差分析、相关性分析、频数分析、主成分分析和回归分析等, 利用 Origin 软件处理后的数据进行频数分析、正态曲线图绘制。

参考朱宗河等^[26]、李丰先等^[27]方法, 按照公式(1)计算各单项指标性状的隶属函数值 $U(X_{ij})$, 计算各单项指标间的相关性、统计频数分布并进行主成分分析; 公式(2)和(3)分别计算各综合指标的权重(W_i)和耐盐碱性综合评价值 D 值。

$$\text{各材料综合指标的隶属函数值: } U(X_{ij}) = (X_{ij} - X_{ij, \min}) / (X_{ij, \max} - X_{ij, \min}); \quad j=1,2,3,\dots,n \quad (1)$$

$$\text{综合指标中的权重: } W_i = P_i / \sum_{i=1}^n P_i \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (2)$$

$$\text{各品种(系)在盐碱胁迫条件下的综合评价值: } D_i = \sum_{i=1}^n [U(X_{ij}) \times W_i] \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (3)$$

式(1)中: X_{ij} 表示第 j 个品种(系)经主成分分析所得第 i 个综合指标在盐碱胁迫得分值; $X_{ij, \max}$ 和 $X_{ij, \min}$ 分别表示所有参试材料某综合指标测定值的最大值和最小值; $U(X_{ij})$ 代表第 j 个品种(系)第 i 个综合指标的隶属函数值。

式(2)中, W_i 表示第 i 个综合指标在所有综合指标中的重要程度即权重; P_i 为代表经主成分分析所得各品种(系)第 i 个综合指标的贡献率。

式(3)中, D_i 值为第 i 个品种(系)在盐碱胁迫条件下的综合评价值, $U(X_{ij})$ 代表第 j 个品种(系)第 i 个综合指标的单项指标隶属函数值; 其中 i 为选取的主成分个数; W_i 表示第 i 个综合指标在所有综合指标

中的重要程度即权重。

用 Excel 进行数据整理, SPSS19.0 软件进行分析, 确保数据格式规范一致, 对品系的耐盐碱性进行综合评价, 并对 286 份油菜种质进行盐碱性数据处理、相关性分析、主成分分析、系统聚类分析和回归分析。以 D 值为因变量, 对各指标的测定值为自变量进行逐步回归分析, 获得回归方程。

表 1 286 份油菜种质材料

Table 1 286 accessions of rapeseed germplasm

| 编号 Number | 品种 (系) Cultivar (line) | 编号 Number | 品种 (系) Cultivar (line) | 编号 Number | 品种 (系) Cultivar (line) | 编号 Number | 品种 (系) Cultivar (line) |
|--------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|---------------------------|--------------|---------------------------|
| 1 | 宁油 6 号 | 73 | 希望 106 | 145 | 甲 PF190 棚 | 217 | 中双 6 号 |
| 2 | 10-崇 23 | 74 | 沪激早 | 146 | WH-55 | 218 | 中油 821 |
| 3 | santana | 75 | A117 | 147 | A98 | 219 | 黔油 4 号 |
| 4 | 中双 2 号 | 76 | 皖油 29 | 148 | WH-28 | 220 | SWU52 |
| 5 | 10-1047 | 77 | Aurora | 149 | major | 221 | 沪油 18 |
| 6 | 华油 6 号 | 78 | 2012-9354 | 150 | 28887 | 222 | WH-30 |
| 7 | WH-58 | 79 | RQ011 | 151 | 滁 610 | 223 | 华油 12 |
| 8 | 03I32B | 80 | 2012-9478 | 152 | 2359 | 224 | 勺叶青 |
| 9 | 非洲油菜乳黄花 | 81 | 10-江棚 2 | 153 | 秦油 1 号 | 225 | 甲预 16 棚 |
| 10 | WH-42 | 82 | 2011-7103 | 154 | 胜利油菜 | 226 | 7-7766-74 套帐 |
| 11 | 沪油 14 | 83 | 2012-8355 | 155 | SWU76 | 227 | WH-88 |
| 12 | 甲预 31 棚 | 84 | 2012-3448 | 156 | 10-崇 24 | 228 | SWU57 |
| 13 | 甲预 17 棚 | 85 | 1322 | 157 | 880101 | 229 | P685 |
| 14 | 1252 | 86 | SWU70 | 158 | 湖北白花油菜 | 230 | WESBROOK |
| 15 | 宁油 16 号 | 87 | SWU113 | 159 | SWU64 | 231 | 华双 128 |
| 16 | 史力佳 | 88 | 滁县白花 | 160 | WH-43 | 232 | 密角多头油菜 |
| 17 | GY282 | 89 | 沪油三号 | 161 | 漕油 2 号 | 233 | 中油 589 |
| 18 | 油研 2 号 | 90 | 红油 3 号 | 162 | 淮油 6 号 | 234 | SWU69 |
| 19 | CY19PXW-65 | 91 | 湘油 11 号 | 163 | 全紫油菜 | 235 | 华双 2 号 |
| 20 | WH-83 | 92 | CY17PXW-58 | 164 | SWU46 | 236 | 豫油 1 号 |
| 21 | Nakaee Chousen | 93 | 青 662A | 165 | WH-49 | 237 | 三高油菜 |
| 22 | CY12PXW-6 | 94 | 农林 43 | 166 | 783 | 238 | 宁油 8 号 |
| 23 | SWU53 | 95 | 扬 J6711 | 167 | B262 | 239 | SWU103 |
| 24 | 宁油 12 号 | 96 | 沪油 19 | 168 | 盐油 2 号 | 240 | A109 |
| 25 | 93210 | 97 | 中双 10 号 | 169 | 铜陵花叶 | 241 | 芥 65-1 |
| 26 | 08-P35 | 98 | 2012-5086 | 170 | 淮油 6 号 | 242 | 当油早 1 号 |
| 27 | 986 | 99 | 甲预 25 棚 | 171 | SWU90 | 243 | rucabo |
| 28 | SWU63 | 100 | A82 | 172 | 10-P10 | 244 | GY284 |
| 29 | 农林 42 | 101 | 阳光 198 | 173 | 1570 | 245 | 7016 |
| 30 | 广德 761 | 102 | 甘油 5 号 | 174 | 浙油 758 | 246 | 甲 951 棚 |

| | | | | | | | |
|----|------------|-----|-------------|-----|------------|-----|---------------|
| 31 | SWU102 | 103 | P158 | 175 | 06H7 | 247 | B285 |
| 32 | P668 | 104 | WH-81 | 176 | SWU96 | 248 | 2012-8380 |
| 33 | SWU71 | 105 | 沪油 17 号 | 177 | GY270 | 249 | CY12Q21535-N3 |
| 34 | 川油 20 | 106 | 2354 | 178 | Daichousen | 250 | B250 |
| 35 | A148 | 107 | WH-45 | 179 | 沛选 170 | 251 | 荣选 |
| 36 | 甲 920 | 108 | 华油 4 号 | 180 | SWU54 | 252 | COBRA |
| 37 | 浙油 18 | 109 | 沪油 12 号 | 181 | SWU80 | 253 | 浙油 17 号 |
| 38 | 恩油 73-1-2 | 110 | 10-崇 25 | 182 | P312 | 254 | WH-41 |
| 39 | SWU74 | 111 | A97 | 183 | 沪油 21 | 255 | 镇 2609 |
| 40 | 宁油 18 号 | 112 | 11-P67 东 | 184 | 中双 10 号 | 256 | C052 |
| 41 | SWU97 | 113 | 10-崇 33 | 185 | Qu | 257 | 2012-8327 |
| 42 | 华油 3 号 | 114 | 甲预 05 棚 | 186 | Niklas | 258 | SWU88 |
| 43 | 12-P25 | 115 | 11-9-705 | 187 | 申黄 1 号 | 259 | AGREV012 |
| 44 | 浙双 3 号 | 116 | P18 父本-保持系 | 188 | SWU60 | 260 | 广德 138 |
| 45 | 10-崇 32 | 117 | 漕泾胜利 | 189 | 淮油 12 号 | 261 | CY20PXW-66 |
| 46 | 丰油 9 号 | 118 | Wesreo | 190 | WH-20 | 262 | 2012-9380 |
| 47 | 苏油 4 号 | 119 | 10-1061 | 191 | 皖油 15 号 | 263 | 2012-11526 |
| 48 | 11-9-703 | 120 | 1281 | 192 | 华油 10 | 264 | 11-504 |
| 49 | SWU66 | 121 | 10-崇 29 | 193 | 1111 | 265 | 11-1184 |
| 50 | 10-江棚 3 | 122 | HX0352 | 194 | 垛油一号 | 266 | 大花球 |
| 51 | 09-P36 | 123 | 加拿大 2 号 | 195 | 97096 | 267 | 苏油 1 号 |
| 52 | Cubs root | 124 | P310 | 196 | 10-1043 | 268 | 782 |
| 53 | chuosenshu | 125 | SWU65 | 197 | 杨油 6 号 | 269 | 沪油 15 |
| 54 | 08-P36 | 126 | 黔油 331 | 198 | CY18PXW-62 | 270 | 563 |
| 55 | Sophia | 127 | 11-P74-8 父本 | 199 | 1472 | 271 | 浙油 21 |
| 56 | 纬隆 88 | 128 | CY12Q8-7 | 200 | SWU100 | 272 | gl302-1 |
| 57 | SWU111 | 129 | WH-59 | 201 | 699 | 273 | WH-33 |
| 58 | CY14PXW-18 | 130 | AGREV019 | 202 | P113 | 274 | 中油 821Q |
| 59 | CY12GJ-1 | 131 | Oscar | 203 | 华油 13 号 | 275 | SWU84 |
| 60 | WX10329 | 132 | SWU47 | 204 | RR002 | 276 | 中双 6 号 |
| 61 | 64 棚-10 | 133 | AGREV021 | 205 | WH-50 | 277 | SWU104 |
| 62 | 740 | 134 | 扬油 4 号 | 206 | WH-60 | 278 | CY12NY-7 |
| 63 | 中双 4 号 | 135 | SWU77 | 207 | 浙双 8 号 | 279 | 7191 |

| | | | | | | | |
|----|------------|-----|------------|-----|--------------|-----|--------|
| 64 | 广德 8104 | 136 | 皖油 16 号 | 208 | 11-P30 | 280 | WH-17 |
| 65 | 扬油 5 号 | 137 | CY13PXW-17 | 209 | R2 | 281 | 皖油早 |
| 66 | 9F087 | 138 | CY16PXW-35 | 210 | 甲 915 | 282 | SWU75 |
| 67 | WH-38 | 139 | WH-61 | 211 | Wase Chousen | 283 | 1360 |
| 68 | 浙双 6 号 | 140 | CY12PXW-4 | 212 | 沪油 18 | 284 | DD1 |
| 69 | 甲 904 | 141 | SWU49 | 213 | 2012-5113 | 285 | 浙油 21 |
| 70 | 阳光 2009 | 142 | YB3 | 214 | CY12QSZ06 | 286 | 封顶 240 |
| 71 | B265 | 143 | SWU85 | 215 | 华航 901 | | |
| 72 | CY21PXW-84 | 144 | 中双 7 号 | 216 | 阳光 198 | | |

2 结果与分析

2.1 甘蓝型油菜苗期耐盐碱指标的变异分析

在同生长环境，即 1.0% NaCl + 0.10% Na₂CO₃ (pH = 10.47) 的盐碱胁迫，三次不同时期的条件下，286 份甘蓝型油菜种质的表观性状均表现出广泛的遗传变异（表 2）。在批次一条件下，平均值依次为叶片数 (LN1) 4.16 片，绿叶数 (GLN1) 3.41 片，绿叶比 (GLR1) 0.83，株高 (SL1) 16.10 cm，地上部鲜重 (SW1) 2.53 g，总根长 (RL1) 15.11 cm，地下部鲜重 (RW1) 1.16 g；变异范围依次为叶片数 2.40 ~ 8.50 片，绿叶数 1.00 ~ 6.00 片，绿叶比 0.20 ~ 1.00，株高 8.90 ~ 26.58 cm，地上部鲜重 0.30 ~ 5.53 g，总根长 7.45 ~ 23.95 cm，地下部鲜重 0.24 ~ 2.85 g；变异系数依次为叶片数 24.42%，绿叶数 24.98%，绿叶比 14.74%，株高 19.02%，地上部鲜重 35.59%，总根长 19.74%，地下部鲜重 39.94%。

在批次二条件下，平均值依次为叶片数 (LN2) 4.42 片，绿叶数 (GLN2) 2.95 片，绿叶比 (GLR2) 0.68，株高 (SL2) 19.61 cm，地上部鲜重 (SW2) 4.18 g，总根长 (RL2) 14.21 cm，地下部鲜重 (RW2) 1.22 g；变异范围依次为叶片数 2.00 ~ 10.67 片，绿叶数 1.40 ~ 5.60 片，绿叶比 0.37 ~ 1.00，株高 11.18 ~ 29.46 cm，地上部鲜重 1.20 ~ 9.79 g，总根长 6.07 ~ 22.40 cm，地下部鲜重 0.35 ~ 3.27 g；变异系数依次为叶片数 25.90%，绿叶数 23.34%，绿叶比 18.66%，株高 17.89%，地上部鲜重 33.97%，总根长 17.85%，地下部鲜重 41.23%。

在批次三条件下，平均值依次为叶片数 (LN3) 3.80 片，绿叶数 (GLN3) 2.84 片，绿叶比 (GLR3) 0.76，株高 (SL3) 16.93 cm，地上部鲜重 (SW3) 3.67 g，总根长 (RL3) 13.94 cm，地下部鲜重 (RW3) 0.83 g；变异范围依次为叶片数 2.00 ~ 8.75 片，绿叶数 1.20 ~ 6.00 片，绿叶比 0.34 ~ 1.00，株高 9.67 ~ 32.00 cm，地上部鲜重 1.27 ~ 10.71 g，总根长 8.00 ~ 22.20 cm，地下部鲜重 0.20 ~ 2.37 g；变异系数依次为叶片数 21.91%，绿叶数 23.05%，绿叶比 17.66%，株高 22.19%，地上部鲜重 37.61%，总根长 17.62%，地下部鲜重 44.86%。

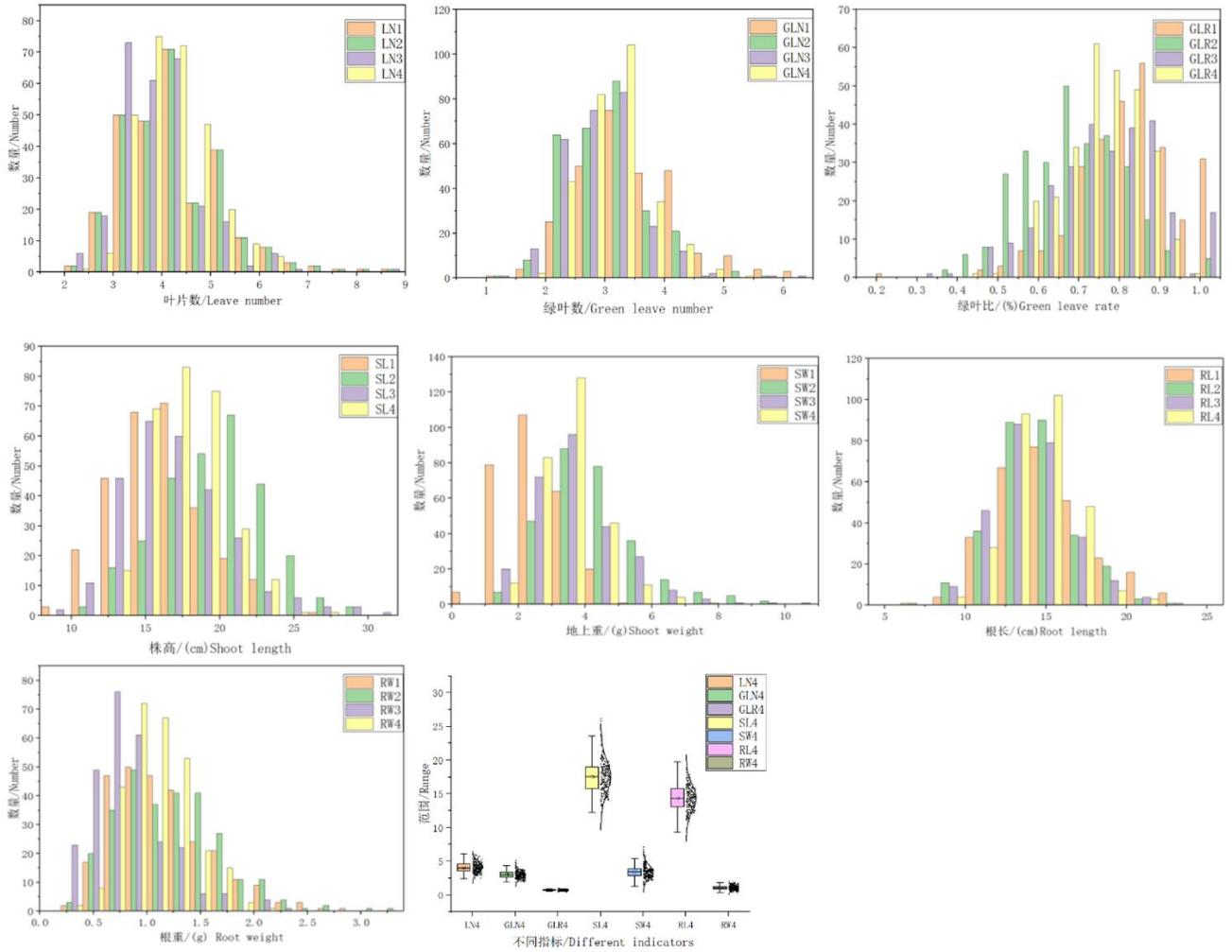
三批次的平均值如下，平均值依次为叶片数 (LN4) 4.13 片，绿叶数 (GLN4) 3.06 片，绿叶比 (GLR4) 0.75，株高 (SL4) 17.53 cm，地上部鲜重 (SW4) 3.45 g，总根长 (RL4) 14.39 cm，地下部鲜重 (RW4) 1.07 g；变异范围依次为叶片数 2.47 ~ 6.20 片，绿叶数 1.93 ~ 5.08 片，绿叶比 0.42 ~ 0.95，株高 12.26 ~ 26.11 cm，地上部鲜重 1.29 ~ 7.15 g，总根长 8.73 ~ 20.56 cm，地下部鲜重 0.38 ~ 2.01 g；变异系数依次为叶片数 17.68%，绿叶数 18.3%，绿叶比 12.00%，株高 13.8%，地上部鲜重 27.25%，总根长 13.76%，地下部鲜重 28.97%。除了平均值外，三批培养的表型指标 LN、GLN、GLR、SL、SW、RL 和 RW 均显示出连续的正态分布（图 1），表明，在各不同盐碱浓度条件下，各表型性状均是由多数，证明均值更可靠，故后续分析使用均值。利用三批培养的表型指标平均值分析，LN4、GLN4、GLR4、SL4、SW4、RL4、SW4、RL4 和 RW4 均显示出连续的正态分布（图 1）；其标准差分别为 0.73、0.56、0.09、2.42、0.94、

1.98、0.31（表 2）；GLN4 为绿叶数和叶片数的比值，范围在 0~1 之间，标准差较小。

表 2 不同时期盐碱胁迫下甘蓝型油菜各表型指标的变异分析

Table 2 Analysis of variation in phenotypic indicators of *Brassica napus* L under different periods of salinity stress

| 性状 Trait | 处理 (批次) | 平均数 Mean | 最小值 Minimum | 最大值 Maximum | 范围 Range | 标准差 Standard Deviation | 变异系数 CV |
|---------------------------|------------|-------------|----------------|----------------|-------------|------------------------------|------------|
| 叶片数 /Leave number | LN1 | 4.16 | 2.40 | 8.50 | 2.40~8.50 | 1.02 | 24.42% |
| | LN2 | 4.42 | 2.00 | 10.67 | 2.00~10.67 | 1.15 | 25.90% |
| | LN3 | 3.80 | 2.00 | 8.75 | 2.00~8.75 | 0.83 | 21.91% |
| | LN4 | 4.13 | 2.47 | 6.20 | 2.47~6.20 | 0.73 | 17.68% |
| 绿叶数 Green leave number | GLN1 | 3.41 | 1.00 | 6.00 | 1.00~6.00 | 0.85 | 24.98% |
| | GLN2 | 2.95 | 1.40 | 5.60 | 1.40~5.60 | 0.69 | 23.34% |
| | GLN3 | 2.84 | 1.20 | 6.00 | 1.20~6.00 | 0.66 | 23.05% |
| | GLN4 | 3.06 | 1.93 | 5.08 | 1.93~5.08 | 0.56 | 18.30% |
| 绿叶比/(%)Green leave rate | GLR1 | 0.83 | 0.20 | 1.00 | 0.20~1.00 | 0.12 | 14.74% |
| | GLR2 | 0.68 | 0.37 | 1.00 | 0.37~1.00 | 0.13 | 18.66% |
| | GLR3 | 0.76 | 0.34 | 1.00 | 0.34~1.00 | 0.13 | 17.66% |
| | GLR4 | 0.75 | 0.42 | 0.95 | 0.42~0.95 | 0.09 | 12.00% |
| 株高/(cm)Shoot length | SL1 | 16.10 | 8.90 | 26.58 | 8.90~26.58 | 3.06 | 19.02% |
| | SL2 | 19.61 | 11.18 | 29.46 | 11.18~29.46 | 3.51 | 17.89% |
| | SL3 | 16.93 | 9.67 | 32.00 | 9.67~32.00 | 3.76 | 22.19% |
| | SL4 | 17.53 | 12.26 | 26.11 | 12.26~26.11 | 2.42 | 13.80% |
| 地上重/(g)Shoot weight | SW1 | 2.53 | 0.30 | 5.53 | 0.30~5.53 | 0.90 | 35.59% |
| | SW2 | 4.18 | 1.20 | 9.79 | 1.20~9.79 | 1.42 | 33.97% |
| | SW3 | 3.67 | 1.27 | 10.71 | 1.27~10.71 | 1.38 | 37.61% |
| | SW4 | 3.45 | 1.29 | 7.15 | 1.29~7.15 | 0.94 | 27.25% |
| 根长/(cm)Root length | RL1 | 15.11 | 7.45 | 23.95 | 7.45~23.95 | 2.98 | 19.74% |
| | RL2 | 14.21 | 6.07 | 22.40 | 6.07~22.40 | 2.54 | 17.85% |
| | RL3 | 13.94 | 8.00 | 22.20 | 8.00~22.20 | 2.46 | 17.62% |
| | RL4 | 14.39 | 8.73 | 20.56 | 8.73~20.56 | 1.98 | 13.76% |
| 根重/(g)Root weight | RW1 | 1.16 | 0.24 | 2.85 | 0.24~2.85 | 0.46 | 39.94% |
| | RW2 | 1.22 | 0.35 | 3.27 | 0.35~3.27 | 0.50 | 41.23% |
| | RW3 | 0.83 | 0.20 | 2.37 | 0.20~2.37 | 0.37 | 44.86% |
| | RW4 | 1.07 | 0.38 | 2.01 | 0.38~2.01 | 0.31 | 28.97% |



LN:代表甘蓝型油菜叶片数, GLN:甘蓝型油菜绿叶数, GLR:代表甘蓝型油菜绿叶比, SL:代表甘蓝型油菜株高, SW:代表甘蓝型油菜地上重, RL:甘蓝型油菜根长, RW:代表甘蓝型油菜根重, 1~4 分别代表批次一、二、三平均值及三个批次的平均值

LN: the number of leaves of *Brassica napus*, GLN: the number of green leaves of *brassica napus*, GLR: the ratio of green leaves of *Brassica napus*, SL: the plant height of *Brassica napus*, SW: the ground weight of *Brassica napus*, RL: the root length of *Brassica napus*, RW: the root weight of *Brassica napus*, and 1-4 respectively represent the average values of batches 1, 2 and 3 and the average values of the three batches

图 1 三批甘蓝型油菜表型指标分布直方图及均值分布正态曲线

Fig. 1 Histograms of the distribution of phenotypic indicators and means for three batches of *Brassica napus*

2.2 盐碱胁迫下油菜种质材料各性状指标相关性分析

利用双变量简单相关系数法对 286 份油菜种质材料受到盐碱胁迫后的 7 个指标的相对值分析 (表 3), 除叶片数与株高相关系数未达到显著性, 叶片数与株高、绿叶数呈负相关, 其他性状之间均呈现正相关并达到了显著或极显著水平, 其中地上重与地上长相关系数较大为 0.642, 地下长与绿叶比相关系数最小为 0.098 ($P < 0.05$), 由于各项各性状间均存在或大或小的相关性, 使得它们所提供的信息发生重叠, 并且各性状在油菜耐盐碱胁迫中所起的作用也不尽相同, 因此, 直接利用这些性状指标不能准确评价各油菜品种的耐盐碱性, 需要更进一步分析来综合评价油菜盐碱胁迫指标。

表 3 盐碱胁迫下甘蓝型油菜种质材料指标参数的相关系数矩阵

Table 3 Correlation coefficient of index parameters of *Brassica napus* L germplasm under saline-alkali stress

| 指标 Index | 叶片数 Leaf number | 绿叶数 Green leaf number | 绿叶比 Green leaf rate | 株高 Shoot length | 地上重 Shoot weight | 根长 Root length | 根重 Root weight |
|-------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|----------------------|
|-------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|----------------------|

| | | | | | | | |
|------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|
| 叶片数 Leave number | 1.000 | | | | | | |
| 绿叶数 Green leave number | 0.746** | 1.000 | | | | | |
| 绿叶比 Green leave rate | 0.315** | 0.386** | 1.000 | | | | |
| 株高 Shoot length | -0.051 | 0.132* | 0.248** | 1.000** | | | |
| 地上重 Shoot weight | 0.334** | 0.485** | 0.204** | 0.642** | 1.000** | | |
| 根长 Root length | 0.227** | 0.294** | 0.098* | 0.290* | 0.362** | 1.000** | |
| 根重 Root weight | 0.132* | 0.237** | 0.143** | 0.347** | 0.575* | 0.393** | 1.000 |

**表示在 1%水平差异极显著, *表示在 5%水平差异显著

** indicates extremely significant differences at the 1% level and * indicates significant differences at the 5% level

2.3 286 份甘蓝型油菜种质材料的主成分分析

为确定筛选油菜苗期耐盐碱性的主要指标, 对 286 份油菜种质材料的 7 个性状指标的进行主成分分析 (表 4)。通过主成分分析, 根据各主成分的特征值和方差贡献率进行主成分的提取。特征值大于 0.7 的主成分有 4 个, 第一主成分的特征值为 2.836, 方差贡献率达到了 40.515%; 第二主成分的特征值为 1.535, 方差贡献率达到了 21.928%; 第三主成分的特征值为 1.070, 方差贡献率达到了 21.928%; 第四主成分的特征值为 0.744, 方差贡献率达到了 10.623% (表 4), 这四个主成分的累计贡献率达到了 88.349%, 当主成分的累积贡献率 > 80% 时, 可代替 7 个萌发指标的绝大部分信息, 综合反映盐碱胁迫下油菜苗期的特性, 可以作为油菜耐盐碱种质评价的综合指标。

由表 5 可知, 对第一主成分产生正向影响的指标有叶片数、绿叶数、叶绿比、株高、地上重、根长、根重, 其中绿叶数、地上重、根长、根重载荷数比较高, 都在 0.60 以上。对第二主成分产生负向影响的指标有叶片数、绿叶数, 载荷数为-0.849 和-0.452, 叶绿比和株高为较高的正载荷指标, 载荷在 0.5 以上。对第二主成分产生正向影响的指标有叶绿数、绿叶比, 其载荷数分别为 0.504、0.769; 叶片数、株高、地上重、根长、根重是产生负影响的指标。对第二主成分产生负向影响的指标有叶片数、绿叶数、株高、地上重, 载荷数都比较低, 在-0.305 ~ -0.022 之间, 根长为较高的正载荷指标, 载荷在 0.6 以上。

表 4 4 个主成分的特征值以及贡献率

Table 4 Characteristic values and contribution rates of the four principal components

| 主成分 Principal components | 初始特征值 Initial eigenvalue | | | 提取平方和载入 Extract Square sum load | | |
|--------------------------------|--------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------|
| | 特征值 Eigenvalue | 方差贡献率/% Variance Contribution rate | 累计贡献率(%) Cumulative variance Contribution rate | 特征值 Eigen value | 方差贡献/% Variance Contribution rate | 累计贡献率(%) Cumulative variance Contribution rate |
| 1 | 2.836 | 40.515 | 40.515 | 2.836 | 40.515 | 40.515 |
| 2 | 1.535 | 21.928 | 62.443 | 1.535 | 21.928 | 62.443 |
| 3 | 1.070 | 21.928 | 77.725 | 1.070 | 21.928 | 77.725 |
| 4 | 0.744 | 10.623 | 88.349 | 0.744 | 10.623 | 88.349 |
| 5 | 0.600 | 8.568 | 96.917 | | | |
| 6 | 0.210 | 3.000 | 99.917 | | | |
| 7 | 0.006 | 0.083 | 100.000 | | | |

表 5 油菜种质材料各因子载荷矩阵

Table 5 Factor loading matrix of rape germplasm materials

| 主成分 Principal components | 叶片数 Leave number | 绿叶数 Green leave number | 绿叶比 Green leave rate | 株高 Shoot length | 地上重 Shoot weight | 根长 Root length | 根重 Root weight |
|-----------------------------|---------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------|---------------------|-------------------|-------------------|
| 1 | 0.504 | 0.731 | 0.331 | 0.609 | 0.865 | 0.608 | 0.672 |
| 2 | -0.849 | -0.452 | 0.525 | 0.519 | 0.129 | 0.016 | 0.219 |
| 3 | -0.025 | 0.504 | 0.769 | -0.203 | -0.140 | -0.248 | -0.319 |
| 4 | -0.119 | -0.022 | 0.142 | -0.376 | -0.305 | 0.666 | 0.174 |

2.4 286 份甘蓝型油菜耐盐碱性的综合评价分析及极端材料筛选

用公式 (2) 计算出 4 个综合指标的权重, 根据各品种各综合指标的 U 值和权重, 利用公式 (3), 获得各品种的耐盐碱综合评价 D 值, 并对 286 份甘蓝型油菜种质进行排序 (表 6)。其中 D 值为 0.153~0.739, 综合排名前十的种质从大到小依次为 8、275、56、105、258、143、282、2、57 和 285, 综合排名后十的种质从小到大依次为 148、129、232、184、122、64、155、74、236 和 123。根据 7 个指标对应载荷数和 4 个主成分方差贡献率, 经计算评价油菜耐盐碱性最佳指标排名前三的分别是: 绿叶比、地上重、绿叶数 (表 4, 表 5)。选取前 2 个性状 (GLR 和 RL) 做四象限图, 选取综合排名前十和后十的品种 (系), 筛选在第二象限和第四象限最边缘的点所对应的基因型为极端材料, 前者表示地上鲜重和绿叶数值都较大的材料, 后者表示鲜重和绿叶数值都较小的材料, 选中的材料在图中用异色标出 (图 2)。共选出耐盐碱材料和盐碱敏感材料各 4 份, 分别为耐性: 8、56、57 和 275 (表 7); 敏感: 64、129、184 和 232, 筛选出耐盐碱极端材料和盐碱敏感材料既含于综合排名前十和后十的种质中, 又是四象限图中筛选出的极端材料, 证明了筛选出材料的可靠性。

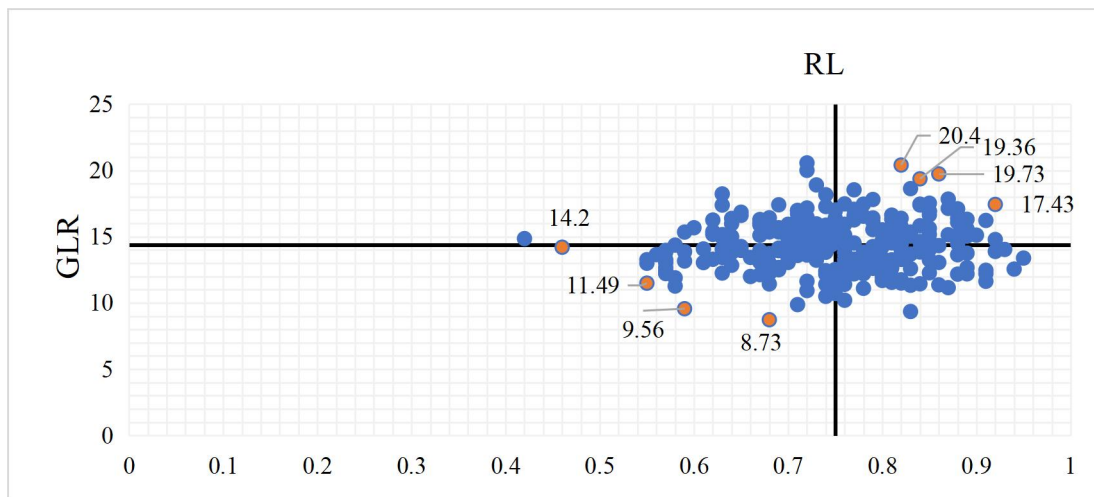


图 2 286 份甘蓝型油菜 SW 与 GLN 性状的四象限图

Fig.2 Four-quadrant plots of SW and GLN traits in 286 *Brassica napus*

表 6 油菜种质材料的综合指标值、权重 (IW)、U (X) 值、D 值、P 值

Table 6 Comprehensive index value, weight (IW), U (X) value, D value and P value of rapeseed germplasm material

| 材料 Material | U(X _{1j}) | U(X _{2j}) | U(X _{3j}) | U(X _{4j}) | D | P | 材料 Material | U(X _{1j}) | U(X _{2j}) | U(X _{3j}) | U(X _{4j}) | D | P |
|----------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---|---|----------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---|---|
|----------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---|---|----------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---|---|

| | | | | | | | | | | | | | |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 0.426 | 0.304 | 0.674 | 0.302 | 0.426 | 0.416 | 144 | 0.455 | 0.368 | 0.56 | 0.58 | 0.455 | 0.458 |
| 2 | 0.642 | 0.909 | 0.798 | 0.052 | 0.642 | 0.625 | 145 | 0.484 | 0.42 | 0.328 | 0.608 | 0.484 | 0.499 |
| 3 | 0.449 | 0.258 | 0.784 | 0.418 | 0.449 | 0.445 | 146 | 0.409 | 0.261 | 0.511 | 0.464 | 0.409 | 0.407 |
| 4 | 0.482 | 0.459 | 0.643 | 0.299 | 0.482 | 0.469 | 147 | 0.322 | 0.274 | 0.403 | 0.247 | 0.322 | 0.324 |
| 5 | 0.548 | 0.39 | 0.854 | 0.491 | 0.548 | 0.529 | 148 | 0.153 | 0.051 | 0.198 | 0 | 0.153 | 0.153 |
| 6 | 0.513 | 0.558 | 0.612 | 0.425 | 0.513 | 0.494 | 149 | 0.522 | 0.516 | 0.632 | 0.295 | 0.522 | 0.518 |
| 7 | 0.611 | 0.571 | 0.907 | 0.339 | 0.611 | 0.579 | 150 | 0.403 | 0.442 | 0.216 | 0.59 | 0.403 | 0.416 |
| 8 | 0.739 | 1 | 0.564 | 0.436 | 0.739 | 0.682 | 151 | 0.385 | 0.293 | 0.429 | 0.433 | 0.385 | 0.383 |
| 9 | 0.525 | 0.456 | 0.61 | 0.486 | 0.525 | 0.517 | 152 | 0.33 | 0.358 | 0 | 0.561 | 0.33 | 0.33 |
| 10 | 0.431 | 0.294 | 0.704 | 0.221 | 0.431 | 0.42 | 153 | 0.438 | 0.377 | 0.512 | 0.363 | 0.438 | 0.433 |
| 11 | 0.614 | 0.773 | 0.428 | 0.652 | 0.614 | 0.616 | 154 | 0.413 | 0.263 | 0.502 | 0.482 | 0.413 | 0.413 |
| 12 | 0.625 | 0.56 | 0.918 | 0.237 | 0.625 | 0.606 | 155 | 0.26 | 0.296 | 0.123 | 0.265 | 0.26 | 0.259 |
| 13 | 0.578 | 0.536 | 0.705 | 0.54 | 0.578 | 0.557 | 156 | 0.416 | 0.498 | 0.407 | 0.188 | 0.416 | 0.421 |
| 14 | 0.366 | 0.313 | 0.289 | 0.484 | 0.366 | 0.363 | 157 | 0.475 | 0.662 | 0.249 | 0.346 | 0.475 | 0.479 |
| 15 | 0.418 | 0.493 | 0.431 | 0.312 | 0.418 | 0.423 | 158 | 0.501 | 0.672 | 0.159 | 0.507 | 0.501 | 0.491 |
| 16 | 0.378 | 0.411 | 0.547 | 0.06 | 0.378 | 0.355 | 159 | 0.512 | 0.48 | 0.676 | 0.43 | 0.512 | 0.508 |
| 17 | 0.592 | 0.559 | 0.808 | 0.47 | 0.592 | 0.562 | 160 | 0.399 | 0.233 | 0.525 | 0.552 | 0.399 | 0.401 |
| 18 | 0.501 | 0.324 | 0.849 | 0.438 | 0.501 | 0.493 | 161 | 0.43 | 0.278 | 0.645 | 0.37 | 0.43 | 0.445 |
| 19 | 0.507 | 0.369 | 0.792 | 0.473 | 0.507 | 0.495 | 162 | 0.499 | 0.265 | 0.682 | 0.696 | 0.499 | 0.524 |
| 20 | 0.574 | 0.486 | 0.769 | 0.419 | 0.574 | 0.567 | 163 | 0.473 | 0.245 | 1 | 0.462 | 0.473 | 0.465 |
| 21 | 0.543 | 0.448 | 0.837 | 0.635 | 0.543 | 0.511 | 164 | 0.47 | 0.41 | 0.58 | 0.476 | 0.47 | 0.469 |
| 22 | 0.598 | 0.606 | 0.758 | 0.532 | 0.598 | 0.596 | 165 | 0.418 | 0.32 | 0.741 | 0.174 | 0.418 | 0.416 |
| 23 | 0.53 | 0.578 | 0.415 | 0.297 | 0.53 | 0.528 | 166 | 0.399 | 0.311 | 0.701 | 0.21 | 0.399 | 0.405 |
| 24 | 0.506 | 0.571 | 0.698 | 0.124 | 0.506 | 0.477 | 167 | 0.491 | 0.481 | 0.171 | 1 | 0.491 | 0.478 |
| 25 | 0.509 | 0.542 | 0.421 | 0.398 | 0.509 | 0.504 | 168 | 0.429 | 0.334 | 0.695 | 0.367 | 0.429 | 0.432 |
| 26 | 0.573 | 0.715 | 0.484 | 0.289 | 0.573 | 0.553 | 169 | 0.441 | 0.366 | 0.655 | 0.374 | 0.441 | 0.437 |
| 27 | 0.439 | 0.52 | 0.505 | 0.188 | 0.439 | 0.402 | 170 | 0.47 | 0.568 | 0.459 | 0.297 | 0.47 | 0.467 |
| 28 | 0.495 | 0.457 | 0.521 | 0.414 | 0.495 | 0.472 | 171 | 0.412 | 0.319 | 0.547 | 0.519 | 0.412 | 0.419 |
| 29 | 0.485 | 0.582 | 0.326 | 0.476 | 0.485 | 0.476 | 172 | 0.525 | 0.456 | 0.788 | 0.237 | 0.525 | 0.513 |
| 30 | 0.326 | 0.172 | 0.451 | 0.372 | 0.326 | 0.322 | 173 | 0.49 | 0.411 | 0.623 | 0.408 | 0.49 | 0.504 |
| 31 | 0.419 | 0.374 | 0.402 | 0.482 | 0.419 | 0.42 | 174 | 0.43 | 0.299 | 0.746 | 0.361 | 0.43 | 0.433 |
| 32 | 0.344 | 0.149 | 0.555 | 0.315 | 0.344 | 0.343 | 175 | 0.297 | 0.17 | 0.621 | 0.109 | 0.297 | 0.284 |
| 33 | 0.491 | 0.593 | 0.492 | 0.28 | 0.491 | 0.485 | 176 | 0.439 | 0.289 | 0.769 | 0.213 | 0.439 | 0.446 |
| 34 | 0.448 | 0.318 | 0.623 | 0.399 | 0.448 | 0.443 | 177 | 0.582 | 0.635 | 0.827 | 0.301 | 0.582 | 0.572 |
| 35 | 0.346 | 0.175 | 0.614 | 0.343 | 0.346 | 0.337 | 178 | 0.29 | 0.234 | 0.565 | 0.177 | 0.29 | 0.275 |
| 36 | 0.435 | 0.442 | 0.549 | 0.194 | 0.435 | 0.41 | 179 | 0.377 | 0.157 | 0.76 | 0.374 | 0.377 | 0.379 |
| 37 | 0.57 | 0.658 | 0.559 | 0.401 | 0.57 | 0.544 | 180 | 0.396 | 0.388 | 0.582 | 0.025 | 0.396 | 0.396 |
| 38 | 0.47 | 0.345 | 0.795 | 0.236 | 0.47 | 0.44 | 181 | 0.398 | 0.307 | 0.44 | 0.547 | 0.398 | 0.405 |
| 39 | 0.414 | 0.418 | 0.557 | 0.16 | 0.414 | 0.402 | 182 | 0.285 | 0.143 | 0.593 | 0.126 | 0.285 | 0.277 |
| 40 | 0.495 | 0.539 | 0.628 | 0.161 | 0.495 | 0.481 | 183 | 0.388 | 0.283 | 0.645 | 0.224 | 0.388 | 0.405 |
| 41 | 0.385 | 0.418 | 0.437 | 0.256 | 0.385 | 0.379 | 184 | 0.241 | 0.288 | 0.127 | 0.298 | 0.241 | 0.241 |
| 42 | 0.474 | 0.361 | 0.614 | 0.403 | 0.474 | 0.464 | 185 | 0.332 | 0.212 | 0.587 | 0.464 | 0.332 | 0.31 |
| 43 | 0.502 | 0.452 | 0.507 | 0.574 | 0.502 | 0.481 | 186 | 0.463 | 0.368 | 0.691 | 0.408 | 0.463 | 0.453 |
| 44 | 0.338 | 0.295 | 0.379 | 0.29 | 0.338 | 0.327 | 187 | 0.473 | 0.474 | 0.648 | 0.22 | 0.473 | 0.464 |
| 45 | 0.393 | 0.288 | 0.454 | 0.442 | 0.393 | 0.406 | 188 | 0.554 | 0.725 | 0.524 | 0.343 | 0.554 | 0.558 |
| 46 | 0.482 | 0.521 | 0.509 | 0.342 | 0.482 | 0.464 | 189 | 0.425 | 0.316 | 0.441 | 0.744 | 0.425 | 0.417 |
| 47 | 0.454 | 0.46 | 0.487 | 0.358 | 0.454 | 0.449 | 190 | 0.381 | 0.215 | 0.664 | 0.422 | 0.381 | 0.385 |
| 48 | 0.443 | 0.365 | 0.65 | 0.256 | 0.443 | 0.443 | 191 | 0.51 | 0.453 | 0.75 | 0.542 | 0.51 | 0.509 |
| 49 | 0.376 | 0.298 | 0.497 | 0.448 | 0.376 | 0.364 | 192 | 0.517 | 0.573 | 0.576 | 0.362 | 0.517 | 0.512 |
| 50 | 0.442 | 0.438 | 0.539 | 0.249 | 0.442 | 0.432 | 193 | 0.376 | 0.214 | 0.529 | 0.372 | 0.376 | 0.363 |
| 51 | 0.334 | 0.359 | 0.328 | 0.218 | 0.334 | 0.312 | 194 | 0.438 | 0.404 | 0.556 | 0.412 | 0.438 | 0.403 |
| 52 | 0.566 | 0.602 | 0.688 | 0.32 | 0.566 | 0.559 | 195 | 0.403 | 0.391 | 0.472 | 0.506 | 0.403 | 0.398 |
| 53 | 0.493 | 0.512 | 0.49 | 0.494 | 0.493 | 0.487 | 196 | 0.391 | 0.369 | 0.658 | 0.286 | 0.391 | 0.374 |
| 54 | 0.51 | 0.433 | 0.73 | 0.392 | 0.51 | 0.504 | 197 | 0.372 | 0.265 | 0.595 | 0.208 | 0.372 | 0.38 |
| 55 | 0.514 | 0.458 | 0.638 | 0.431 | 0.514 | 0.509 | 198 | 0.526 | 0.352 | 0.702 | 0.731 | 0.526 | 0.516 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 56 | 0.682 | 0.725 | 0.792 | 0.505 | 0.682 | 0.675 | 199 | 0.588 | 0.568 | 0.463 | 0.623 | 0.588 | 0.587 |
| 57 | 0.641 | 0.628 | 0.843 | 0.297 | 0.641 | 0.628 | 200 | 0.334 | 0.332 | 0.32 | 0.365 | 0.334 | 0.335 |
| 58 | 0.46 | 0.441 | 0.637 | 0.187 | 0.46 | 0.452 | 201 | 0.561 | 0.652 | 0.535 | 0.356 | 0.561 | 0.552 |
| 59 | 0.561 | 0.502 | 0.629 | 0.775 | 0.561 | 0.545 | 202 | 0.374 | 0.318 | 0.406 | 0.416 | 0.374 | 0.375 |
| 60 | 0.48 | 0.312 | 0.712 | 0.461 | 0.48 | 0.482 | 203 | 0.418 | 0.214 | 0.645 | 0.525 | 0.418 | 0.416 |
| 61 | 0.396 | 0.535 | 0.2 | 0.379 | 0.396 | 0.389 | 204 | 0.461 | 0.225 | 0.583 | 0.7 | 0.461 | 0.469 |
| 62 | 0.539 | 0.416 | 0.553 | 0.74 | 0.539 | 0.549 | 205 | 0.377 | 0.116 | 0.581 | 0.621 | 0.377 | 0.376 |
| 63 | 0.319 | 0.197 | 0.595 | 0.246 | 0.319 | 0.31 | 206 | 0.513 | 0.359 | 0.845 | 0.471 | 0.513 | 0.513 |
| 64 | 0.258 | 0.005 | 0.648 | 0.42 | 0.258 | 0.241 | 207 | 0.403 | 0.174 | 0.786 | 0.553 | 0.403 | 0.399 |
| 65 | 0.631 | 0.677 | 0.674 | 0.368 | 0.631 | 0.635 | 208 | 0.553 | 0.509 | 0.686 | 0.477 | 0.553 | 0.548 |
| 66 | 0.51 | 0.653 | 0.272 | 0.469 | 0.51 | 0.502 | 209 | 0.421 | 0.207 | 0.742 | 0.562 | 0.421 | 0.412 |
| 67 | 0.478 | 0.456 | 0.372 | 0.586 | 0.478 | 0.485 | 210 | 0.429 | 0.262 | 0.615 | 0.519 | 0.429 | 0.436 |
| 68 | 0.566 | 0.446 | 0.702 | 0.723 | 0.566 | 0.576 | 211 | 0.36 | 0.26 | 0.452 | 0.193 | 0.36 | 0.36 |
| 69 | 0.391 | 0.229 | 0.575 | 0.381 | 0.391 | 0.41 | 212 | 0.452 | 0.306 | 0.615 | 0.566 | 0.452 | 0.452 |
| 70 | 0.452 | 0.509 | 0.374 | 0.437 | 0.452 | 0.443 | 213 | 0.522 | 0.48 | 0.592 | 0.456 | 0.522 | 0.508 |
| 71 | 0.424 | 0.226 | 0.675 | 0.547 | 0.424 | 0.414 | 214 | 0.299 | 0.259 | 0.448 | 0.169 | 0.299 | 0.289 |
| 72 | 0.429 | 0.391 | 0.427 | 0.581 | 0.429 | 0.429 | 215 | 0.428 | 0.347 | 0.657 | 0.317 | 0.428 | 0.419 |
| 73 | 0.451 | 0.59 | 0.196 | 0.488 | 0.451 | 0.429 | 216 | 0.383 | 0.273 | 0.548 | 0.444 | 0.383 | 0.385 |
| 74 | 0.26 | 0.209 | 0.255 | 0.246 | 0.26 | 0.267 | 217 | 0.313 | 0.261 | 0.407 | 0.192 | 0.313 | 0.307 |
| 75 | 0.533 | 0.619 | 0.61 | 0.123 | 0.533 | 0.537 | 218 | 0.572 | 0.531 | 0.783 | 0.437 | 0.572 | 0.562 |
| 76 | 0.431 | 0.408 | 0.365 | 0.42 | 0.431 | 0.428 | 219 | 0.444 | 0.316 | 0.707 | 0.299 | 0.444 | 0.442 |
| 77 | 0.404 | 0.44 | 0.262 | 0.381 | 0.404 | 0.4 | 220 | 0.513 | 0.369 | 0.771 | 0.538 | 0.513 | 0.486 |
| 78 | 0.563 | 0.702 | 0.406 | 0.471 | 0.563 | 0.551 | 221 | 0.545 | 0.349 | 0.902 | 0.466 | 0.545 | 0.541 |
| 79 | 0.567 | 0.574 | 0.564 | 0.452 | 0.567 | 0.572 | 222 | 0.383 | 0.188 | 0.569 | 0.659 | 0.383 | 0.352 |
| 80 | 0.573 | 0.644 | 0.597 | 0.298 | 0.573 | 0.564 | 223 | 0.543 | 0.464 | 0.772 | 0.535 | 0.543 | 0.54 |
| 81 | 0.432 | 0.362 | 0.491 | 0.407 | 0.432 | 0.438 | 224 | 0.303 | 0.182 | 0.66 | 0.084 | 0.303 | 0.281 |
| 82 | 0.475 | 0.341 | 0.593 | 0.501 | 0.475 | 0.492 | 225 | 0.409 | 0.064 | 0.716 | 0.77 | 0.409 | 0.415 |
| 83 | 0.448 | 0.471 | 0.258 | 0.44 | 0.448 | 0.455 | 226 | 0.347 | 0.129 | 0.703 | 0.295 | 0.347 | 0.341 |
| 84 | 0.576 | 0.813 | 0.285 | 0.354 | 0.576 | 0.578 | 227 | 0.515 | 0.573 | 0.394 | 0.555 | 0.515 | 0.506 |
| 85 | 0.467 | 0.413 | 0.439 | 0.401 | 0.467 | 0.468 | 228 | 0.558 | 0.487 | 0.861 | 0.292 | 0.558 | 0.559 |
| 86 | 0.412 | 0.337 | 0.485 | 0.362 | 0.412 | 0.411 | 229 | 0.454 | 0.258 | 0.879 | 0.351 | 0.454 | 0.421 |
| 87 | 0.471 | 0.399 | 0.469 | 0.577 | 0.471 | 0.486 | 230 | 0.576 | 0.471 | 0.787 | 0.512 | 0.576 | 0.561 |
| 88 | 0.478 | 0.464 | 0.57 | 0.396 | 0.478 | 0.481 | 231 | 0.516 | 0.347 | 0.874 | 0.544 | 0.516 | 0.508 |
| 89 | 0.586 | 0.619 | 0.733 | 0.262 | 0.586 | 0.593 | 232 | 0.221 | 0.13 | 0.263 | 0.358 | 0.221 | 0.208 |
| 90 | 0.583 | 0.592 | 0.61 | 0.232 | 0.583 | 0.591 | 233 | 0.421 | 0.292 | 0.755 | 0.35 | 0.421 | 0.401 |
| 91 | 0.393 | 0.215 | 0.655 | 0.364 | 0.393 | 0.393 | 234 | 0.45 | 0.512 | 0.487 | 0.308 | 0.45 | 0.44 |
| 92 | 0.514 | 0.5 | 0.646 | 0.294 | 0.514 | 0.5 | 235 | 0.316 | 0.274 | 0.548 | 0.099 | 0.316 | 0.292 |
| 93 | 0.481 | 0.458 | 0.589 | 0.244 | 0.481 | 0.475 | 236 | 0.264 | 0.114 | 0.586 | 0.16 | 0.264 | 0.245 |
| 94 | 0.491 | 0.492 | 0.624 | 0.389 | 0.491 | 0.459 | 237 | 0.416 | 0.214 | 0.75 | 0.488 | 0.416 | 0.398 |
| 95 | 0.416 | 0.402 | 0.433 | 0.417 | 0.416 | 0.404 | 238 | 0.487 | 0.369 | 0.915 | 0.284 | 0.487 | 0.459 |
| 96 | 0.555 | 0.552 | 0.69 | 96 | 0.555 | 0.552 | 239 | 0.482 | 0.35 | 0.896 | 0.299 | 0.482 | 0.462 |
| 97 | 0.547 | 0.547 | 0.622 | 97 | 0.547 | 0.547 | 240 | 0.427 | 0.24 | 0.781 | 0.303 | 0.427 | 0.414 |
| 98 | 0.441 | 0.173 | 0.677 | 98 | 0.441 | 0.173 | 241 | 0.428 | 0.267 | 0.804 | 0.328 | 0.428 | 0.418 |
| 99 | 0.398 | 0.283 | 0.561 | 99 | 0.398 | 0.283 | 242 | 0.525 | 0.546 | 0.678 | 0.15 | 0.525 | 0.515 |
| 100 | 0.445 | 0.518 | 0.378 | 100 | 0.445 | 0.518 | 243 | 0.541 | 0.787 | 0.461 | 0.173 | 0.541 | 0.539 |
| 101 | 0.5 | 0.37 | 0.672 | 0.498 | 0.5 | 0.499 | 244 | 0.545 | 0.784 | 0.464 | 0.224 | 0.545 | 0.558 |
| 102 | 0.476 | 0.501 | 0.628 | 0.2 | 0.476 | 0.469 | 245 | 0.487 | 0.408 | 0.707 | 0.406 | 0.487 | 0.482 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 103 | 0.493 | 0.406 | 0.609 | 0.553 | 0.493 | 0.477 | 246 | 0.357 | 0.17 | 0.603 | 0.354 | 0.357 | 0.358 |
| 104 | 0.503 | 0.517 | 0.564 | 0.266 | 0.503 | 0.496 | 247 | 0.495 | 0.492 | 0.691 | 0.325 | 0.495 | 0.497 |
| 105 | 0.66 | 0.911 | 0.714 | 0.319 | 0.66 | 0.647 | 248 | 0.619 | 0.774 | 0.542 | 0.333 | 0.619 | 0.634 |
| 106 | 0.383 | 0.348 | 0.488 | 0.302 | 0.383 | 0.388 | 249 | 0.431 | 0.353 | 0.334 | 0.762 | 0.431 | 0.42 |
| 107 | 0.454 | 0.508 | 0.501 | 0.109 | 0.454 | 0.445 | 250 | 0.367 | 0.141 | 0.706 | 0.409 | 0.367 | 0.352 |
| 108 | 0.489 | 0.512 | 0.632 | 0.205 | 0.489 | 0.473 | 251 | 0.425 | 0.335 | 0.679 | 0.432 | 0.425 | 0.412 |
| 109 | 0.51 | 0.467 | 0.688 | 0.303 | 0.51 | 0.51 | 252 | 0.495 | 0.472 | 0.74 | 0.343 | 0.495 | 0.491 |
| 110 | 0.455 | 0.422 | 0.666 | 0.14 | 0.455 | 0.444 | 253 | 0.523 | 0.586 | 0.534 | 0.525 | 0.523 | 0.52 |
| 111 | 0.442 | 0.595 | 0.189 | 0.263 | 0.442 | 0.437 | 254 | 0.276 | 0.181 | 0.551 | 0.115 | 0.276 | 0.256 |
| 112 | 0.409 | 0.377 | 0.631 | 0.114 | 0.409 | 0.395 | 255 | 0.562 | 0.466 | 0.685 | 0.605 | 0.562 | 0.569 |
| 113 | 0.367 | 0.325 | 0.501 | 0.216 | 0.367 | 0.361 | 256 | 0.59 | 0.707 | 0.658 | 0.309 | 0.59 | 0.586 |
| 114 | 0.403 | 0.414 | 0.418 | 0.306 | 0.403 | 0.407 | 257 | 0.519 | 0.638 | 0.665 | 0.25 | 0.519 | 0.491 |
| 115 | 0.313 | 0.164 | 0.553 | 0.223 | 0.313 | 0.318 | 258 | 0.652 | 0.806 | 0.735 | 0.378 | 0.652 | 0.633 |
| 116 | 0.326 | 0.272 | 0.388 | 0.249 | 0.326 | 0.327 | 259 | 0.524 | 0.5 | 0.782 | 0.396 | 0.524 | 0.504 |
| 117 | 0.459 | 0.492 | 0.51 | 0.313 | 0.459 | 0.461 | 260 | 0.429 | 0.299 | 0.61 | 0.548 | 0.429 | 0.419 |
| 118 | 0.516 | 0.514 | 0.654 | 0.306 | 0.516 | 0.515 | 261 | 0.41 | 0.421 | 0.516 | 0.301 | 0.41 | 0.394 |
| 119 | 0.446 | 0.229 | 0.728 | 0.428 | 0.446 | 0.456 | 262 | 0.586 | 0.66 | 0.466 | 0.678 | 0.586 | 0.579 |
| 120 | 0.407 | 0.495 | 0.293 | 0.323 | 0.407 | 0.432 | 263 | 0.491 | 0.376 | 0.619 | 0.614 | 0.491 | 0.5 |
| 121 | 0.557 | 0.498 | 0.658 | 0.572 | 0.557 | 0.566 | 264 | 0.472 | 0.343 | 0.777 | 0.427 | 0.472 | 0.471 |
| 122 | 0.256 | 0.159 | 0.321 | 0.235 | 0.256 | 0.262 | 265 | 0.46 | 0.409 | 0.647 | 0.209 | 0.46 | 0.461 |
| 123 | 0.274 | 0.169 | 0.446 | 0.176 | 0.274 | 0.274 | 266 | 0.368 | 0.259 | 0.59 | 0.416 | 0.368 | 0.367 |
| 124 | 0.463 | 0.407 | 0.541 | 0.351 | 0.463 | 0.462 | 267 | 0.595 | 0.535 | 0.75 | 0.359 | 0.595 | 0.587 |
| 125 | 0.335 | 0.431 | 0.203 | 0.186 | 0.335 | 0.336 | 268 | 0.474 | 0.414 | 0.898 | 0.353 | 0.474 | 0.444 |
| 126 | 0.282 | 0.201 | 0.336 | 0.205 | 0.282 | 0.277 | 269 | 0.511 | 0.538 | 0.645 | 0.407 | 0.511 | 0.498 |
| 127 | 0.352 | 0.204 | 0.669 | 0.223 | 0.352 | 0.345 | 270 | 0.421 | 0.289 | 0.707 | 0.319 | 0.421 | 0.431 |
| 128 | 0.38 | 0.42 | 0.283 | 0.237 | 0.38 | 0.385 | 271 | 0.484 | 0.522 | 0.616 | 0.28 | 0.484 | 0.487 |
| 129 | 0.22 | 0.23 | 0.216 | 0.024 | 0.22 | 0.215 | 272 | 0.516 | 0.497 | 0.719 | 0.277 | 0.516 | 0.507 |
| 130 | 0.376 | 0.426 | 0.364 | 0.186 | 0.376 | 0.363 | 273 | 0.396 | 0.199 | 0.609 | 0.349 | 0.396 | 0.404 |
| 131 | 0.419 | 0.408 | 0.322 | 0.536 | 0.419 | 0.41 | 274 | 0.376 | 0 | 0.774 | 0.662 | 0.376 | 0.39 |
| 132 | 0.585 | 0.683 | 0.473 | 0.599 | 0.585 | 0.564 | 275 | 0.706 | 0.855 | 0.798 | 0.217 | 0.706 | 0.699 |
| 133 | 0.424 | 0.216 | 0.482 | 0.712 | 0.424 | 0.438 | 276 | 0.552 | 0.445 | 0.759 | 0.478 | 0.552 | 0.527 |
| 134 | 0.315 | 0.198 | 0.402 | 0.287 | 0.315 | 0.318 | 277 | 0.499 | 0.454 | 0.586 | 0.551 | 0.499 | 0.488 |
| 135 | 0.382 | 0.461 | 0.089 | 0.757 | 0.382 | 0.383 | 278 | 0.579 | 0.46 | 0.831 | 0.497 | 0.579 | 0.579 |
| 136 | 0.528 | 0.55 | 0.629 | 0.285 | 0.528 | 0.539 | 279 | 0.614 | 0.59 | 0.803 | 0.375 | 0.614 | 0.606 |
| 137 | 0.35 | 0.308 | 0.334 | 0.328 | 0.35 | 0.358 | 280 | 0.566 | 0.61 | 0.576 | 0.167 | 0.566 | 0.554 |
| 138 | 0.383 | 0.411 | 0.389 | 0.33 | 0.383 | 0.383 | 281 | 0.337 | 0.197 | 0.633 | 0.197 | 0.337 | 0.323 |
| 139 | 0.462 | 0.377 | 0.673 | 0.372 | 0.462 | 0.467 | 282 | 0.645 | 0.678 | 0.692 | 0.432 | 0.645 | 0.632 |
| 140 | 0.351 | 0.331 | 0.311 | 0.442 | 0.351 | 0.37 | 283 | 0.542 | 0.495 | 0.706 | 0.483 | 0.542 | 0.537 |
| 141 | 0.429 | 0.421 | 0.439 | 0.258 | 0.429 | 0.439 | 284 | 0.629 | 0.628 | 0.798 | 0.445 | 0.629 | 0.605 |
| 142 | 0.498 | 0.631 | 0.347 | 0.378 | 0.498 | 0.5 | 285 | 0.639 | 0.656 | 0.844 | 0.437 | 0.639 | 0.647 |
| 143 | 0.647 | 0.764 | 0.585 | 0.536 | 0.647 | 0.658 | 286 | 0.623 | 0.598 | 0.738 | 0.559 | 0.623 | 0.622 |
| 权重 W_i | 0.405 | 0.219 | 0.219 | 0.106 | | | 权重 W_i | 0.405 | 0.219 | 0.219 | 0.106 | | |

表 7 筛选出的 4 个耐碱耐盐的甘蓝型油菜种质

Table 7 Four germplasm of *Brassica napus* that are tolerant to alkali salts were selected

| 材料 Material | 品种(系) Cultivar (line) | 叶片数 Leave number | 绿叶数 Green leave number | 绿叶比 Green leave rate | 株高 Shoot length | 地上重 Shoot weight | 根长 Root length | 根重 Root weight |
|----------------|--------------------------|---------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------|---------------------|-------------------|-------------------|
| 8 | 03I32B | 5.6 | 4.8 | 0.86 | 25.81 | 4.9 | 19.73 | 1.54 |
| 56 | 纬隆 88 | 4 | 3.67 | 0.92 | 21.59 | 5.13 | 17.43 | 1.23 |
| 57 | SWU111 | 3.58 | 3 | 0.84 | 21.22 | 4.18 | 19.36 | 1.32 |
| 275 | SWU84 | 4.2 | 3.44 | 0.82 | 23.07 | 6 | 20.4 | 1.51 |

2.5 甘蓝型油菜耐盐碱性鉴定指标的筛选

为了预测甘蓝型油菜苗期的耐盐能力,以耐盐碱性综合评价值(D值)作因变量,根据7个指标的得分情况,筛选出的5个指标:绿叶数、绿叶比、地上重、根长和根重,建立综合数学评价模型,建立最优回归方程: $D = -0.425 - 0.001X_2 + 0.657X_3 + 0.031X_5 + 0.015X_6 + 0.064X_7$ ($F=3775.866^{**}$, $R^2=0.985$)。式中 X_2 、 X_3 、 X_5 、 X_6 、 X_7 分别代表绿叶数、绿叶比、地上重、根长和根重。由方程可知,除叶片数和株高外,上述5个指标对油菜苗期盐碱性有极显著影响,在甘蓝型油菜耐盐碱筛选上,可以参考这5个指标。286个甘蓝型油菜种质的耐盐碱性预测值(P)与耐盐碱性综合评价值(D值)极显著相关, $r=0.993^{**}$ (表6),表明用此方程对甘蓝型油菜种质的耐盐碱性进行预测准确性高、效果好。因此,在油菜苗期测定其绿叶数、绿叶比、地上重、根长和根重,并通过回归方程估算其D值,可以初步判断种质的耐盐碱性。

3 讨论

目前,在中国土壤盐碱化问题愈发严重,中国的盐碱地总面积不断增加,而通过种植作物可以降低盐碱地的土壤盐分,改善土壤生态环境,提高盐碱地的生产力^[28-30]。有研究表明油菜适应性强,是可用于盐碱地开发利用的作物^[18]。油菜耐盐碱性鉴定主要在萌发期、苗期、全育期。其中苗期被认为是植物对盐、碱胁迫较为敏感的时期,也是耐盐碱性鉴定的常见时期^[31-32]。因此,苗期油菜种质资源耐盐碱性的综合评价和利用,对选育耐盐碱油菜品种具有极大的现实意义。万和平等^[33]研究发现油菜的耐盐碱能力相对较强,能耐受1.3-1.5%的NaCl或0.10%的Na₂CO₃,本研究使用的盐碱浓度与之相符。本研究以1.0% NaCl + 0.12% Na₂CO₃ (pH = 10.47)的盐碱浓度对286份甘蓝型油菜种质材料进行苗期耐盐性综合评价,研究发现,变异系数依次为叶片数17.68%,绿叶数18.3%,绿叶比12.00%,株高13.8%,地上部鲜重27.25%,总根长13.76%,地下部鲜重28.97%,进一步表明甘蓝型油菜种质资源的耐盐性变异范围较小。

耐盐碱性是指作物在盐碱胁迫时所表现出的忍耐能力。在盐碱胁迫下,油菜的株高变矮、株鲜重下降、叶色变深、叶片皱缩、根系生长受阻^[31,32]。基于油菜在盐碱胁迫条件下的表型变化,本研究合理地选取了叶片数、绿叶比、地上重、根长、根重和株高作为评价油菜耐盐碱性的筛选指标。但目前,油菜耐盐碱性筛选指标并没有统一的标准。油菜种子萌发期耐盐碱评价指标包括发芽势、发芽率、发芽指数、胚芽长、胚根长等相关性状;油菜苗期主要评价指标为茎长、苗长、根长、根鲜重、根干重、叶面积等相关性状^[34-36];万和平等^[25]等以油菜苗的地上鲜重、地上长、绿叶数、根鲜重、地下长度进行指标测定,采用油菜水培系统,对87份甘蓝型油菜品种/品系(自交系)苗期进行耐盐碱性鉴定与评价,以绿叶数为指标其耐盐碱性划分等级,此研究的优点是快速准确、简便高效,而本研究鉴定方法虽较为繁琐,但筛选结果更加精准,其油菜耐盐碱性筛选最佳指标排名前三的分别是:绿叶比、地上重、绿叶数;发现多个指标对油菜耐盐碱性进行鉴定或快速鉴定,油菜绿叶数和绿叶比是油菜耐盐碱鉴定的关键指标,这与本研究的观点不谋而合;李萍等^[24]将发芽势、发芽率、芽长、根长、相对芽长、相对根长等作为评价指标,对146份甘蓝型油菜萌

发期进行耐盐性筛选和评价, 筛选出 6 份强耐盐的甘蓝型油菜种质, 此研究中存在空白对照, 使用了相对芽长和相对根长等评价指标, 本研究鉴定的品种更多体现盐碱条件下的生长能力。朱孔志等^[37]比较 5 种油菜品种生长期间的叶片长、宽以及叶柄长、株高、角果长度、有效分枝点高度、主轴长度、分枝水平生长长度等性状, 并考察成熟时有效分枝数、二次有效分枝数、单株有效角果数、总每荚粒数和千粒重等性状, 鉴定方法可使甘蓝型油菜的生长与产量相关联, 而本研究使用水培的方法来模拟盐碱地, 能精准地控制营养液成分及盐浓度、pH 等环境, 但也存在以一些不足, 主要无法完全模拟土壤中变化复杂的环境胁迫因子, 如盐碱水平易受光照、雨水和温度等因素的影响, 因此还需将筛选的耐盐碱油菜种质在盐碱地实地种植, 验证其耐盐碱能力。本研究对 286 份甘蓝型油菜种质苗期阶段的叶片数、绿叶数、绿叶比、株高、地上重、根长、根重这七个指标进行相关性分析, 发现除叶片数与株高呈负相关且未达到显著性, 其他性状之间均呈现正相关并达到了显著或极显著水平, 其中部分相关系数达 0.6 以上, 各指标相关性较为明显。这些指标对耐盐碱综合评价指标的贡献率不同, 因此, 如果想要准确反映某一油菜材料的耐盐碱性, 应当尽可能多指标进行综合评价分析, 才能全方位反映苗期油菜的耐盐碱性。

近年来, 采用主成分分析法和隶属函数法筛选重要鉴定指标, 进行作物抗逆性鉴定的综合评价较为可靠, 已在多个作物中得到初步应用, 如大麦耐湿性^[38]、胡麻抗旱性^[39]、马铃薯抗旱性^[40]、油菜耐铝性^[41]等作物进行抗逆性筛选鉴定, 已经成为综合评价作物抗逆性的有效且可靠的方法。本研究通过主成分分析法, 将 7 个指标转化为 4 个更具代表性的综合指标, 这 4 个综合指标可以集中体现差异不明显的原指标的信息^[42]。利用模糊数学中的隶属函数法, 计算了不同种质的耐盐碱性综合评价值 (D 值), D 值能够反映不同种质之间的耐盐碱性差异。经过盐碱胁迫处理, 油菜表现出叶片皱缩、发黄脱落、株鲜重下降等表型特征。本研究评价油菜耐盐碱性的最佳指标为绿叶比、地上重和绿叶数, 这一结果证明了研究的可靠性。通过耐盐碱综合评价体系和四象限图筛选的极端材料, 综合共筛选出耐盐碱材料和盐碱敏感材料各 3 份, 分别为耐性: 8、56、57 和 275; 敏感: 64、129、184 和 232, 品系 8 的隶属函数值为 0.739, 排名第 1; 品系 275 的隶属函数值为 0.706, 排名第 2; 品系 56 的隶属函数值为 0.682, 排名第 3; 品系 57 的隶属函数值为 0.641, 排名第 9; 品系 64 的隶属函数值 0.258, 排名第 81; 品系 129 的隶属函数值 0.22, 排名第 285; 品系 184 的隶属函数值 0.241, 排名第 283; 品系 232 的隶属函数值 0.221, 排名第 284; 证明了筛选出极端材料的可靠性。但由于作物在不同生长发育阶段所表现的耐盐碱性可能存在一定差异在苗期筛选出的耐盐性较好的油菜种质是否在油菜花期和成熟期表现出相同的特性还有待于进一步验证。利用线性回归法通过芽鲜质量这一指标建立数学评价模型, 能预测甘蓝型油菜萌发期的耐盐能力, 可以作为大规模筛选油菜耐盐性的可靠指标。为了预测甘蓝型油菜萌发期的耐盐能力, 以耐盐碱性综合评价值 (D 值) 作因变量, 根据 7 个指标的得分情况, 筛选出的 5 个指标: 绿叶数、绿叶比、地上重、根长和根重, 建立综合性数学评价模型, $D = -0.425 - 0.001X_2 + 0.657X_3 + 0.031X_5 + 0.015X_6 + 0.064X_7$ ($F = 3775.866^{**}$, $R^2 = 0.985$)。式中 X_2 、 X_3 、 X_5 、 X_6 、 X_7 分别代表绿叶数、绿叶比、地上重、根长和根重, 可以作为大规模筛选油菜耐盐碱性的可靠指标。

4 结论

本研究在该盐碱浓度 1.0% NaCl + 0.10% Na₂CO₃ (pH = 10.47) 处理下测定了 286 份甘蓝型油菜苗期耐盐碱相关形态指标, 利用相关性分析、主成分分析、频数分析、极端材料筛选分析、隶属函数法对 286 份甘蓝型油菜的耐盐性进行综合评价, 筛选出 4 份耐碱盐的甘蓝型油菜种质和 4 份盐碱敏感种质。通过逐步回归分析, 建立了最优回归方程: $D = -0.425 - 0.001X_2 + 0.657X_3 + 0.031X_5 + 0.015X_6 + 0.064X_7$

($F = 3775.866^{**}$, $R^2 = 0.985$), 认为测定出绿叶数、绿叶比、地上重、根长和根重可快速有效鉴定苗期甘蓝型油菜种质资源对耐盐碱性。

参考文献

- [1] YAMAGUCHI T, BLUMWALD E. Developing salt-tolerant crop plants: challenges and opportunities. Trends in plant science, 2005, 10(12): 615-620.
- [2] 毛庆莲, 王胜. 国内盐碱地治理趋势探究浅析[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(1): 302-306.
- [3] MAO Q L, WANG S. Analysis on the trend of saline-alkali land management in China. Hubei Agricultural Sciences, 2019, 59(1): 302-306. (in Chinese)
- [4] 万林生, 孙红芹, 倪正斌, 严国红, 周汝琴. 油菜盐油杂 3 号耐盐性试验及沿海滩涂全程机械化栽培技术. 浙江农业科学, 2017, 58(6): 959-961.
- [5] WAN L S, SUN H Q, NI Z B, YAN G H, QIN R Q. Experimental study on salt tolerance of Salt-Youza-3 in rape and mechanized cultivation technology in

- coastal shoals. *Zhejiang Agricultural Sciences*, 2017, 58(6): 959-961.
- [4] 王雷, 郭岩, 杨淑华. 非生物胁迫与环境适应性育种的现状及对策. *中国科学: 生命科学*, 2021, 51(10): 1424-1434.
WANG L, GUO Y, YANG S H. Current situation and countermeasures of abiotic stress and environmental adaptive breeding. *Science China Life Sciences*, 2021, 51(10): 1424-1434. (in Chinese)
- [5] 万何平, 张浩, 余忆, 陈敬东, 曾长立, 赵伦, 文静, 沈金雄, 傅廷栋. 油菜耐盐碱研究与应用. *中国农业科技导报*, 2022, 24(12): 59-67.
WAN H P, ZHANG H, YU Y, CHEN J D, ZENG C L, ZHAO L, WEN J, SHEN J X, FU T D. Research and application of salt-alkali tolerance in rapeseed. *China Agricultural Science and Technology Herald*, 2022, 24(12): 59-67. (in Chinese)
- [6] 马波. 氮肥、密度对寒地超级稻‘龙粳 31’产量的互作效应研究. *中国农学通报*, 2018, 34(6): 8-13.
MA B. Study on interaction effect of nitrogen fertilizer and density on yield of super rice 'Longjing 31' in cold region. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(6): 8-13. (in Chinese)
- [7] 李霞, 曹昆, 阎丽娜, 王超, 孙志伟, 周月兰. 盐碱胁迫对不同水稻材料苗期生长特性的影响. *中国农学通报*, 2008, 170(8): 252-256.
LI X, CAO K, YAN L N, WANG C, SUN Z W, ZHOU Y L. Effects of saline-alkali stress on growth characteristics of different rice materials at seedling stage. *2008, 170(8): 252-256. (in Chinese)*
- [8] 吴鹏博, 李立军, 张艳丽. 油菜苗期耐盐碱性综合评价与根际土壤有机酸含量比较. *作物杂志*, 2022(1): 110-115.
WU P B, LI L J, ZHANG Y L. Comprehensive evaluation of saline-alkali tolerance and comparison of rhizosphere soil organic acid content at rapeseed seedling stage. *Crops*, 2022(1): 110-115. (in Chinese)
- [9] 李琳, 于崧, 蒋永超, 张婷婷, 邹春雷, 金珊珊, 郭建华, 梁海芸. 芸豆苗期耐盐碱性鉴定及品种筛选研究. *植物生理学报*, 2016, 52(1): 62-72.
LI L, YU S, JIANG Y C, ZHANG T T, ZOU C L, JING S S, GUO J H, LIANG H Y. Identification of saline-alkali tolerance and variety screening of kidney bean at seedling stage. *Journal of Plant physiology*, 2016, 52(1): 62-72. (in Chinese)
- [10] 张林, 杨剑飞, 于立伟, 于晶, 王军军, 王振华, 刘显军. 玉米苗期耐盐碱鉴定体系优化及 50 份美国自交系耐盐碱性鉴定. *种子*, 2016, 35(5): 94-98.
ZHANG L, YANG J F, YU L W, YU J, WANG J J, WANG Z H, LIU X J. Optimization of salt-alkali tolerance identification system for maize seedlings and identification of salt-alkali tolerance of 50 American inbred lines. *Seed*, 2016, 35(5): 94-98. (in Chinese)
- [11] 王晓春, 杨天辉, 王川, 杨炜迪, 高婷. 混合盐碱胁迫对紫花苜蓿的生长和生理指标的影响. *中国农学通报*, 2022, 38(19): 139-145.
WANG X C, YANG T H, WANG C, YANG W D, GAO T. Effects of mixed salt and alkali stress on growth and physiological indexes of alfalfa. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(19): 139-145. (in Chinese)
- [12] 赵俊香, 任翠梅, 吴凤芝, 刘守伟, 王殿奎. 16 份菊芋种质苗期耐盐碱性筛选与综合鉴定. *中国生态农业学报*, 2015, 23(5): 620-6.
ZHAO J X, REN C M, WU F Z, LIU S W, WANG D K. Screening and comprehensive identification of saline-alkali tolerance of 16 Jerusalem artichoke germplasm at seedling stage. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(5): 620-6. (in Chinese)
- [13] GOMESFILHO E, LIMA C R, COSTA J H, SILVA A C, LIMA M D, LACERDA C F. Cowpea ribonuclease: properties and effect of NaCl-salinity on its activation during seed germination and seedling establishment. *Plant Cell Rep*, 2008, 27(1): 147-157.
- [14] 杨少辉, 季静, 王罡, 宋英今. 盐胁迫对植物影响的研究进展. *分子育种学*, 2006, 4(3): 139-142.
YANG S H, JI J, WANG G, SONG Y J. Research progress on effects of salt stress on plants. *Molecular breeding*, 2006, 4(3): 139-142. (in Chinese)
- [15] WANG Y, Nii N. Changes in chlorophyll, ribulose biphosphate carboxylase-oxygenase, glycine betaine content, photosynthesis and transpiration in *Amaranthus tricolor* leaves during salt stress. *J Hort Sci Biotech*, 2000, (75): 623-627.
- [16] 沈金雄, 傅廷栋. 我国油菜生产、改良与食用油供给安全. *中国农业科技导报*, 2011, 13 (1): 1-8.
SHENG J X, FU T D. Rape production improves and edible oil supply safety. *China Agricultural Science and Technology Herald*, 2002, 44(50): 537-540. (in Chinese)
- [17] 王汉中, 殷艳. 我国油料产业形势分析与对策建议. *中国油料作物学报*, 2014, 36 (3): 414-421.
WANG H Z, YIN Y. Situation analysis and development countermeasure of oil industry of our country. *Chinese Journal of Oil Crops Sciences*, 2014, 36(3): 414-421. (in Chinese)
- [18] BANAEI-ASL F, BANDEHAGH A, ULIAEI E D, FARAJZADEN D, SAKATA K, MUSTAFA G, KOMATSU S. Proteomic analysis of canola root inoculated with bacteria under salt stress. *J. Proteom.*, 2015, 124: 88-111.
- [19] 汪波, 文静, 张风华, 李立军, 来永才, 任长忠, 鲁剑巍, 沈金雄, 郭亮, 周广生, 傅廷栋. 耐盐碱油菜品种选育及修复利用盐碱地研究进展[J]. *科技导报*, 2021, 39(23): 59-64.
WANG W B, WEN J, ZHANG F H, LI L J, LAI Y C, REN C Z, LU J W, GUO L, ZHOU G S, FU T D. Research progress on breeding and restoration of saline-alkali soil for saline-alkali resistant rapeseed varieties. *Science and Technology Review*, 2021, 39(23): 59-64. (in Chinese)
- [20] 万何平, 戴希刚, 陈敬东. 甘蓝型油菜对盐胁迫的响应及耐盐相关性状 QTL 研究进展. *中国油料作物学报*, 2020, 42 (4): 536-544.
WAN H P, DAI X G, CHEN J D. Research progress on response to salt stress and QTLs for salt-tolerant traits in *Brassica napus* L. *Chinese Journal of Oil Crops Sciences*, 2020, 42(4): 536-544. (in Chinese)
- [21] 张培通, 张萼, 郭文琦, 陈建平, 李春宏, 王永慧, 胡茂龙. 油菜宁杂 21 号在江苏沿海滩涂盐碱地的种植表现及高产栽培技术要点. *江苏农业科学*, 2014, 42(06): 84-85.
ZHANG P T, ZHANG E, GUO W Q, CHEN J P, LI C H, WANG Y H, HU M L. Planting performance of Rapeseed Ningza 21 in saline-alkali land of Jiangsu coastal flat and key points of high-yield cultivation techniques. *Jiangsu agricultural sciences*, 2014, 42(06): 84-85. (in Chinese)
- [22] 杨洋, 王亚娟, 阴法庭, 张风华. 盐碱胁迫对油菜苗期生理及光合特性的影响. *北方园艺*, 2020, 462(15): 1-8.
YANG Y, WANG Y J, YIN F T, ZHANG F H. Effects of saline-alkali stress on physiological and photosynthetic characteristics of rape seedlings. *Northern horticulture*, 2020, 462(15): 1-8. (in Chinese)
- [23] 李班, 吕莹, 杨明煊, 宋婷, 于放, 刘志文. 盐碱胁迫对甘蓝型油菜生理及分子机制的影响. *华北农学报*, 2022, 37(3): 86-93.
LI B, LV Y, YANG M X, SONG T, YU F, LIU Z W. Effects of saline-alkali stress on physiological and molecular mechanisms of *Brassica napus* L. *Journal of*

- North China Agronomy, 2022, 37(3): 86-93. (in Chinese)
- [24] 李萍, 燕佳琦, 张鹤, 张燕, 陶顺仙, 张琪. 146 份甘蓝型油菜种质芽期耐盐性筛选及评价. 西北农业学报, 2021, 30(6): 848-859.
- LI P, YAN J Q, ZHANG H, ZHANG Y, TAO S X, ZHANG Q. Screening and evaluation of salt tolerance in 146 Brassica napus germplasm at bud stage. Northwest Agricultural Journal, 2021, 30(6): 848-859. (in Chinese)
- [25] 万何平, 余亿, 陈敬东, 鲁金春子, 冉景鸿, 戴希刚, 文静, 傅廷栋, 沈金雄, 曾长立. 甘蓝型油菜耐盐碱性快速鉴定方法与应用. 中国油料作物学报, 2023, 1-9.
- WAN H P, YU Y, CHEN J D, LU J C Z, RAN J H, DAI X G, WEN J, FU T D, SHEN J X, ZENG C L. Rapid identification method and application of salt-alkali tolerance in brassica napus. Chinese Journal of Oil Crops, 2023, 1-9. (in Chinese)
- [26] 朱宗河, 郑文寅, 张学昆. 甘蓝型油菜耐旱相关性状的主成分分析及综合评价. 中国农业科学, 2011, 44(9): 1775-1787.
- ZHU Z H, ZHENG W Y, ZHANG X K. Principal component analysis and comprehensive evaluation on morphological and agronomic traits of drought tolerance in rapeseed (*Brassica napus* L.). Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(9): 1775-1787. (in Chinese)
- [27] 李丰先, 周宇飞, 王艺陶, 孙璐, 白薇, 闫彤, 许文娟, 黄瑞冬. 高粱品种萌发期耐碱性筛选与综合鉴定. 中国农业科学, 2013, 46(9): 1762-1771
- LI F X, ZHOU Y F, WAN Y T, SUN L, BAI W, YAN T, XU W J, HUANG R D. Screening and comprehensive identification of alkaline resistance of sorghum varieties at germination stage. Chinese agricultural sciences, 2013, 46(9): 1762-1771. (in Chinese)
- [28] 杨阳. 盐碱地中国潜在的耕地资源. 中国农村科技, 2018 (11):8-13.
- YANG Y. Saline-alkali land is the potential cultivated land resources in China. Chinese rural science and technology, 2018 (11): 8-13. (in Chinese)
- [29] 刘东洋, 徐接亮, 张风华. 不同油菜品种对盐碱土壤理化性质与微生物多样性的影响. 新疆农业科学, 2019, 56(2): 246-257.
- LIU D Y, XU J L, ZHANG F H. Effects of different rapeseed varieties on physicochemical properties and microbial diversity of saline-alkali soil. Xinjiang agricultural sciences, 2019, 56(2): 246-257. (in Chinese)
- [30] 万林生, 孙红芹, 倪正斌, 严国红, 周汝琴. 油菜盐油杂 3 号耐盐性试验及沿海滩涂全程机械化栽培技术. 浙江农业科学, 2017, 58(6): 959-961.
- WAN C L, SUN H Q, NI Z B, YAN G H, ZHOU R Q. Salt-tolerance test of rape Salt-oil zaza No.3 and mechanized cultivation technology of coastal shoals. Zhejiang agricultural sciences, 2017, 58(6): 959-961. (in Chinese)
- [31] 高建明, 夏卜贤, 袁庆华, 罗峰, 韩芸, 桂枝, 裴忠有, 孙守钧. 高粱种质材料幼苗期耐盐碱性评价 [J]. 应用生态学报, 2012, 23 (5) : 1303-1310.
- Gao J M, Xia B X, Yuan Q H, Luo F, Han Y, Gui Z, Pei Z Y, Sun S J. Sorghum seedling period and salt-tolerant germplasm materials evaluation. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(5): 1303-1310. (in Chinese)
- [32] 张春宵, 袁英, 刘文国, 李文华, 王丹, 李万军, 李晓辉. 玉米杂交种幼苗耐盐碱筛选与大田鉴定的比较分析 [J]. 玉米科学, 2010, 18 (5) : 14-18.
- Zhang C X, Yuan Y, Liu W G, Li W H, Wang D, Li W J, Li X H. Comparative analysis of salt-alkali tolerance screening and field identification of maize hybrids at seedling stage, 2010, 18 (5) : 14-18. (in Chinese)
- [33] 万何平. 甘蓝型油菜苗期耐盐相关性状的全基因组关联分析. 武汉: 华中农业大学, 2017.
- WAN H P. Genome-wide association analysis of salt-tolerant traits in brassica napus seedlings. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [34] WANI A S, AHMAD A, HAYAT S, FARIDUDDIN Q. Salt-induced modulation in growth, photosynthesis and antioxidant system in two varieties of Brassica juncea. Saudi journal of biological sciences, 2013, 20(2): 183-193.
- [35] HAYAT S, MAHESHWARI P, WANI A S, IRFAN M, ALYEMENI M N, AHMAD A. Comparative effect of 28 homobrassinolide and salicylic acid in the amelioration of NaCl stress in Brassica juncea L. Plant physiology and biochemistry, 2012, 53: 61-68.
- [36] KAUR H, SIRHINDI G, BHARDWAJ R, ALYEMENI M N, SIDDIQUE K H, AHMAD P. 28-homobrassinolide regulates antioxidant enzyme activities and gene expression in response to salt-and temperature-induced oxidative stress in Brassica juncea. Scientific Reports, 2018, 8(1): 1-13.
- [37] 朱孔志, 吴明昊, 申玉香, 李洪山, 杨世才, 杜希宽, 丁世峰. 不同油菜品种在盐碱地的耐盐性鉴定及筛选. 浙江农业科学, 2018, 59(8): 1354-1356.
- ZHU K Z, WU M H, SHEN Y X, LI H S, YANG S C, DU X K, DING S F. Identification and screening of salt tolerance of different rape varieties in saline-alkali soil. Zhejiang agricultural science, 2018, 59(8): 1354-1356. (in Chinese)
- [38] 王军, 周美学, 许如根, 吕超, 黄祖六. 大麦耐湿性鉴定指标和评价方法研究. 中国农业科学, 2007, 40(10): 2145-2152.
- WANG J, ZHOU M X, XU R G, LV C, HUANG Z L. Study on indexes and evaluation methods of moisture resistance of barley. Chinese agricultural sciences, 2007, 40(10): 2145-2152. (in Chinese)
- [39] 祁旭升, 王兴荣, 许军, 张建平, 米君. 胡麻种质资源成株期抗旱性评价. 中国农业科学, 2010, 43(15): 3076-3087.
- QI X S, WANG X R, XU J, ZHANG J P, MI J. Evaluation of drought resistance of flax germplasm resources at adult stage. Chinese agricultural sciences, 2010, 43(15): 3076-3087. (in Chinese)
- [40] 李丰先, 罗磊, 李亚杰, 姚彦红, 范奕, 李德明. 基于 PCA 和隶属函数法分析的马铃薯创新种质抗旱性鉴定与分类. 干旱区资源与环境, 2022, 36(11): 141-147.
- LI F X, LUO L, LI Y J, YAO Y H, FAN Y, LI D M. Identification and classification of drought resistance of potato germplasm based on PCA and membership function analysis. Arid area resources and environment, 2022, 36(11): 141-147. (in Chinese)
- [41] 熊洁, 邹小云, 陈伦林, 李书宇, 邹晓芬, 宋来强. 油菜苗期耐铝基因型筛选和鉴定指标的研究. 中国农业科学, 2015, 48(16): 3112-3120.
- XIONG J, ZOU X Y, CHEN L L, LI S Y, ZOU X F, SONG L Q. Study on screening and identification indexes of Aluminum Tolerance Genotypes in rape seedling stage. Chinese agricultural sciences, 2015, 48(16): 3112-3120. (in Chinese)
- [42] NIELSEN D C, NELSON N O. Black bean sensitivity to water stress at various growth stages. Crop Science, 1998, 38(2): 422-427.