

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2026.55044

研究简报

331 份花生种质苗期耐盐性综合评价和强耐盐种质鉴定

王菲菲¹ 张胜忠¹ 杨贵华² 苗华荣¹ 胡晓辉¹ 张则林³ 刘莎莎⁴
乔利仙⁵ 单世华^{1,*} 陈 静^{1,*}

¹ 山东省花生研究所, 山东青岛 266100; ² 济南市农业技术推广服务中心, 山东济南 250002; ³ 滦州市油榨镇人民政府, 河北唐山 063702; ⁴ 青岛鲁聚丰种业有限公司, 山东青岛 266200; ⁵ 青岛农业大学农学院, 山东青岛 266109

摘 要: 土壤盐渍化是限制花生扩种及产量的主要制约因素之一, 筛选优异耐盐花生种质并鉴定相关指标, 为耐盐品种选育和耐盐分子机制研究奠定基础。以 331 份花生种质为研究对象, 利用水培法于苗期进行耐盐性鉴定。测定了 8 个指标: SPAD 值、苗高、地上鲜重、地下鲜重、地上干重、地下干重、鲜重根冠比和干重根冠比。采用主成分分析法、隶属函数分析法及聚类分析法对花生苗期耐盐性进行综合评价。在不同盐浓度处理下, 苗高、地上鲜重、地下鲜重、地上干重、鲜重根冠比和干重根冠比 6 个指标在不同种质间均表现出显著差异。在盐胁迫下, 花生生长受抑制, 其中 4 个指标的测定值较对照显著降低。相关性分析显示, 8 个指标的耐盐系数均存在相关性, 其中地下鲜重和地下干重的相关性最强(相关系数为 0.83)。主成分分析将 8 个指标转换成 3 个主成分, 累计方差贡献率达 76.22%。基于 D 值进行聚类分析, 将 331 份种质划分为 5 类耐盐型, 第 I 类强耐盐型(11 份)、第 II 类耐盐型(33 份)、第 III 类中间型(104 份)、第 IV 类盐敏感型(42 份)、第 V 类高盐敏感型(141 份)。通过逐步回归分析, 构建花生苗期耐盐评价回归方程: $Y = 0.032 + 0.163X_4 + 0.137X_3 + 0.073X_1 - 0.158X_2 + 0.111X_5 + 0.080X_6$ 。 D 值适用于花生苗期耐盐性评价, 筛选出包括华实 2、AM-Georganic、中花 6 等在内的 11 份强耐盐性种质。苗高、地下干重和地上干重可作为花生苗期耐盐性鉴定的主要指标。

关键词: 花生; 苗期; 耐盐评价; 主成分分析; 隶属函数分析; 种质鉴定

Comprehensive evaluation of salt tolerance and identification of elite salt-tolerant germplasm in 331 peanut accessions at seedling stage

Wang Fei-Fei¹, Zhang Sheng-Zhong¹, Yang Gui-Hua², Miao Hua-Rong¹, Hu Xiao-Hui¹, Zhang Ze-Lin³, Liu Sha-Sha⁴, Qiao Li-Xian⁵, Shan Shi-Hua^{1,*}, and Chen Jing^{1,*}

¹ Shandong Peanut Research Institute, Qingdao 266100, Shandong, China; ² Jinan Agricultural Technology Extension Center, Jinan 250002, Shandong, China; ³ Youzha Town People's Government, Luanzhou City, Tangshan 063702, Hebei, China; ⁴ Qingdao Lujufeng Seed Industry Co., Ltd., Qingdao 266200, Shandong, China; ⁵ College of Agronomy, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, Shandong, China

Abstract: Soil salinization is a major constraint limiting the expansion and yield of peanut cultivation. Screening salt-tolerant peanut germplasm and identifying related traits provide a foundation for breeding salt-tolerant varieties and investigating the mechanisms underlying salt tolerance. In this study, the salt tolerance of 331 peanut accessions was evaluated at the seedling stage using a hydroponic system. Eight parameters were measured: SPAD value, plant height, shoot fresh weight, root fresh weight, shoot dry weight, root dry weight, fresh weight root/shoot ratio, and dry weight root/shoot ratio. A comprehensive evaluation of salt tolerance was conducted using principal component analysis (PCA), membership function analysis, and cluster analysis. Under different salt concentrations, six parameters—plant height, shoot fresh weight, root fresh weight, shoot dry weight, fresh weight root/shoot ratio, and dry weight root/shoot ratio—showed significant differences among accessions. Salt stress inhibited peanut growth and significantly reduced four of these parameters compared with the control. Correlation analysis revealed

本研究由山东省农业良种工程项目(2024LZGC031)和山东省农业科学院创新工程项目(CXGC2025E02)资助。

This study was supported by the Shandong Province Agriculture Improved Seed Project (2024LZGC031) and the Innovation Project of Shandong Academy of Agriculture Sciences (CXGC2025E02).

* 通信作者(Corresponding authors): 陈静, E-mail: mianbaohua2008@126.com; 单世华, E-mail: shanshi@163.com

第一作者联系方式: E-mail: wangfeifeisj@163.com

Received (收稿日期): 2025-07-11; Accepted (接受日期): 2025-10-30; Published online (网络出版日期): 2025-11-10.

URL: <https://link.cnki.net/urlid/11.1809.S.20251110.1545.006>

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

significant relationships among the salt tolerance coefficients of all eight parameters, with the strongest correlation observed between root fresh weight and root dry weight ($r = 0.83$). PCA reduced the eight parameters to three principal components, accounting for a cumulative variance of 76.22%. Based on D -values (comprehensive evaluation scores), cluster analysis grouped the 331 accessions into five categories: Group I (highly salt-tolerant, 11 accessions), Group II (salt-tolerant, 33 accessions), Group III (intermediate, 104 accessions), Group IV (salt-sensitive, 42 accessions), and Group V (highly salt-sensitive, 141 accessions). A stepwise regression analysis yielded a predictive equation for evaluating salt tolerance in peanut seedlings: $Y = 0.032 + 0.163X_4 + 0.137X_3 + 0.073X_1 - 0.158X_2 + 0.111X_5 + 0.080X_6$. The D -value proved effective for assessing salt tolerance at the seedling stage, and 11 salt-tolerant germplasms, including Huashi 2, AM-Ceorganic, and Zhonghua 6, were identified. Plant height, root dry weight, and shoot dry weight were identified as key indicators for evaluating peanut salt tolerance at the seedling stage.

Keywords: peanut; seedling stage; assessment of salt tolerance; principal component analysis; subordinate function analysis; germplasm evaluation

土壤盐渍化是影响全球粮食产量和农业可持续性的主要非生物胁迫和限制因子之一, 全球约 7% (约 9.5 亿公顷) 的土地受到土壤盐渍化的影响^[1-2]。在全球 2.3 亿公顷的耕地中, 约有 20%~30% 遭受了一定程度的土壤盐渍化, 由于土地开垦或灌溉, 这一比例将继续增加。虽然作物生产越来越多地受到环境压力 (如盐渍化) 的影响, 但据预测, 到 2050 年, 世界人口将增加到 97 亿, 粮食需求将增加 60% 以上^[3]。在盐渍土中, 过量的钠离子和氯离子释放到土壤中, 被植物主动吸收、细胞膜稳定性减弱、氧化毒害增加, 抑制种子萌发、生长发育并最终影响产量^[4]。因此, 培育耐盐作物将通过增加盐渍化农田的生产能力和可耕种的土地面积来改善世界粮食供应。我国约有 7% 的基本耕地为盐渍土, 盐渍化的农田已达到 667 万公顷, 且有逐年增加的趋势^[4-5]。黄海三角洲有可供利用的盐碱耕地近 67 万公顷, 如果耐盐碱作物发展起来, 将对保障中国粮仓和中国饭碗起到重要作用。

花生 (*Arachis hypogaea* L.) 是我国重要的油料作物和经济作物, 2024 年全国花生种植面积 476.68 万公顷, 总产 1914.8 万吨, 占油料作物 (不含大豆) 总产的 50% 左右 (中华人民共和国国家统计局数据), 在保障国家油脂安全方面具有举足轻重的作用。2025 年中央一号文件提出“挖掘花生扩种潜力”, 盐碱地为花生提供了巨大的扩种空间, 花生是中等耐盐作物, 目前生产上推广的耐盐花生品种仅能在轻度盐渍地种植, 适宜中度盐渍地 (3‰) 及以上种植的品种严重缺乏。因此, 开展花生耐盐鉴定并培育更强的耐盐品种, 对增加盐碱地的利用效率、提升全国花生种植面积具有重要意义, 将助力花生生产飞跃式发展并进一步增强我国油料保障供给能力。

国内外学者对作物的耐盐性研究开展了广泛工作, 如水稻、玉米、小麦、大豆、油菜、棉花、高

粱等均取得了一定进展^[6]。大部分的耐盐鉴定工作基于萌发期和苗期, 因为萌芽期和苗期是盐胁迫的敏感期也是关键期, 萌发期耐盐能力决定了作物在盐胁迫下的出苗率^[7], 而幼苗期则影响作物在盐胁迫下正常生长^[8-9]。作为中度耐盐作物的花生萌发期、幼苗期耐盐鉴定也取得了一定进展。刘永惠等^[10]以相对发芽势、相对发芽率和相对发芽指数为指标对 41 个花生品种 (系) 萌发期的耐盐性进行鉴定, 确定 0.5% NaCl 为耐盐鉴定浓度, 最终筛选到 3 份耐盐品种。李晓婷等^[11]以 0.7% NaCl 作为萌发期耐盐性鉴定的最适浓度, 以露白率和发芽率为指标筛选出 5 个耐盐品种 (系)。苗华荣等^[12]利用水培法在 0.75% NaCl 下测定了一个 RIL 群体苗期耐盐性指标 (包括苗高、根长、茎叶鲜重、根鲜重等), 结合遗传图谱进行花生耐盐 QTL 定位分析。王亮等^[13]用 0.5% NaCl 处理花生幼苗, 测量发芽率、发芽势、苗期主根长、地上鲜重、根鲜重、地上干重、根干重, 计算耐盐系数和隶属函数综合值, 结果表明盐处理抑制花生幼苗生长, 花生幼苗期干物质积累可作为评价花生品种耐盐性的主要指标。李晶晶等^[14]以 NaCl : Na₂SO₄ : NaHCO₃ : Na₂CO₃ 盐碱混合溶液模拟盐碱地条件, 对 6 个高油酸品种萌发期种子发芽率及盐害率, 以及苗期幼苗干重及耐盐系数进行比较分析, 盐碱严重抑制种子发芽和幼苗干重。利用隶属函数值对芽期和苗期指标进行评价, 筛选出高度耐盐碱品种“宇花 33 号”。孙东雷等^[15]以 5 g L⁻¹ NaCl 溶液作为花生萌发期耐盐性鉴定的浓度, 采用隶属函数及聚类分析方法对 47 份花生材料进行耐盐性评价和种质筛选, 认为相对含水量和鲜重是最佳鉴定指标。

既往研究存在材料样本量不足^[13,16-18]、地理覆盖有限及代表性欠缺等问题。因此, 亟需基于广泛地理来源的花生种质资源, 系统开展苗期耐盐性研

究以覆盖遗传多样性。本研究从前期积累的种质库中精选 331 份代表性材料, 建立水培体系进行耐盐性评价与种质筛选。通过多维度评价方法, 系统分析种质的 8 个关键性状, 包括 SPAD 值、苗高、地上鲜重、地下鲜重、地上干重、地下干重、鲜重根冠比及干重根冠比。据此筛选强耐盐种质, 构建苗期耐盐评价指标体系, 为耐盐品种选育、机制解析及评价标准制定提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 植物材料及生长条件

本试验所用的 331 份花生种质由课题组多年收集得到(表 1)。于 2023 年种植在山东省莱西市实验农场(36.86°N, 120.53°E), 种植方式为起垄双行单粒播种, 行距 40.0 cm, 株距 16.7 cm, 覆膜。5 月上旬播种, 种子成熟后收获晾晒, 种子具有较高的一致性。

表 1 331 份供试花生种质名称
Table 1 Names of the 331 peanut germplasms tested

序号 Number	种质 Germplasm	序号 Number	种质 Germplasm	序号 Number	种质 Germplasm
1	鲁花 8 号 Luhua 8	113	AM-C1501-HO/L	225	正花 6088 Zhenghua 6088
2	鲁花 10 号 Luhua 10	114	AM-C1801_H_917	226	ZZL-ZH6
3	鲁花 11 号 Luhua 11	115	AM-C1801_H_954	227	远杂 9847 Yuanza 9847
4	鲁花 12 号 Luhua 12	116	AM-C1801_H_980	228	徐花 18 号 Xuhua 18
5	花育 16 号 Huayu 16	117	AM-C1801_H_1036	229	ZZL-XH1
6	花育 20 号 Huayu 20	118	AM-C1801_H_1075	230	ZZL-W10
7	花育 23 号 Huayu 23	119	AM-C1801_H_1202	231	鲁花 6 号 Luhua 6
8	花育 24 号 Huayu 24	120	AM-C1801_H_1250	232	ZZL-KT1
9	花育 25 号 Huayu 25	121	AM-C1801_H_1272	233	华实 2 号 Huashi 2
10	花育 26 号 Huayu 26	122	AM-C1801_H_1314	234	ZZL-GH88
11	花育 27 号 Huayu 27	123	AM-C1801_H_1327	235	ZZL-T1 Tian 1
12	花育 28 号 Huayu 28	124	AM-C1801_H_1331	236	ZZL-GY1
13	花育 30 号 Huayu 30	125	AM-C1801_H_1333	237	ZZL-NZ
14	花育 31 号 Huayu 31	126	AM-C1801_H_1374	238	ZZL-YNXH
15	花育 32 号 Huayu 32	127	AM-C1801_H_1375	239	ZZL-YNLZ
16	花育 34 号 Huayu 34	128	AM-Flordia 07	240	ZZL-SCH
17	花育 35 号 Huayu 35	129	AM-Baily high OL	241	ZZL-RHH1
18	花育 39 号 Huayu 39	130	AM-Marcl	242	ZZL-QFH
19	花育 50 号 Huayu 50	131	AM-C46	243	ZZL-TG2-2
20	丰花 1 号 Fenghua 1	132	AM-IAC322	244	ZZL-YD1
21	丰花 2 号 Fenghua 2	133	AM-IAC886	245	ZZL-YSLPF
22	丰花 3 号 Fenghua 3	134	AM-IAC389	246	ZZL-WKLPFU
23	丰花 4 号 Fenghua 4	135	AM-Georganic	247	ZZL-WKLJAVA
24	丰花 5 号 Fenghua 5	136	AM-Tifguard	248	ZZL-WKL XBYX
25	丰花 6 号 Fenghua 6	137	AM-SLR	249	ZZL-XYL7
26	山花 7 号 Shanhua 7	138	AM-SS	250	ZZL-SLLK1
27	山花 8 号 Shanhua 8	139	AM-Nematoder(s)	251	ZZL-SLLK2
28	山花 10 号 Shanhua 10	140	AM-Georgia-14N(HO/L)	252	ZZL-HL
29	山花 12 号 Shanhua 12	141	AM-SCD	253	ZZL-GSDLJ
30	山花 16 号 Shanhua 16	142	AM-C1501-48(S)	254	ZZL-F2-2
31	山花 17 号 Shanhua 17	143	AM-13-3424	255	ZZL-FG2-3
32	青花 5 号 Qinghua 5	144	AM-13-3476	256	ZZL-FG02
33	青花 6 号 Qinghua 6	145	AM-N080820IJcT	257	ZZL-FDL
34	青花 7 号 Qinghua 7	146	AM-NC3033	258	ZZL-AEJLYA

(续表 1)

序号 Number	种质 Germplasm	序号 Number	种质 Germplasm	序号 Number	种质 Germplasm
35	潍花 7 号 Weihua 7	147	AM-13-3532	259	ZZL-AEJLYC
36	潍花 8 号 Weihua 8	148	AM-C1801-H-1042	260	ZZL-N2-3
37	潍花 9 号 Weihua 9	149	AM-C1801-H-1012	261	ZZL-H103
38	潍花 10 号 Weihua 10	150	AM-C1801-H-924	262	ZZL-H108
39	临花 5 号 Linhua 5	151	AM-C1801-H-1028	263	ZZL-H1602
40	临花 6 号 Linhua 6	152	AM-C1801-H-952	264	ZZL-9102-16-1
41	科花 1 号 Kehua 1	153	AM-SPT06-06	265	ZZL-9102-54-2
42	日花 1 号 Rihua 1	154	潍花 6 号 Weihua 6	266	ZZL-20L-24
43	花育 51 号 Huayu 51	155	潍花 14 号 Weihua 14	267	ZZL-225
44	花育 52 号 Huayu 52	156	潍花 20 号 Weihua 20	268	ZZL-1202
45	花育 62 号 Huayu 62	157	潍花 21 号 Weihua 21	269	ZZL-1210
46	花育 951 号 Huayu 951	158	潍花 22 号 Weihua 22	270	ZZL-9102
47	花育 953 号 Huayu 953	159	潍花 30 号 Weihua 30	271	豫航花 1 号 Yuhanghua 1
48	花育 954 号 Huayu 954	160	冀花 4 号 Jihua 4	272	汾花 8 号 Fenhua 8
49	花育 955 号 Huayu 955	161	冀油 8 号 Jiyou 8	273	花育 33 号 Huayu 33
50	花育 956 号 Huayu 956	162	中花 5 号 Zhonghua 5	274	花育 45 号 Huayu 45
51	花育 957 号 Huayu 957	163	中花 8 号 Zhonghua 8	275	花育 9113 号 Huayu 9113
52	花育 958 号 Huayu 958	164	天府 18 号 Tianfu 18	276	花育 9118 号 Huayu 9118
53	花育 9512 号 Huayu 9512	165	天府 3 号 Tianfu 3	277	花育 9510 号 Huayu 9510
54	花育 9513 号 Huayu 9513	166	湘花 2008 号 Xianghua 2008	278	花育 9610 号 Huayu 9610
55	花育 9514 号 Huayu 9514	167	湘花 555 号 Xianghua 555	279	济花 1209 号 Jihua 1209
56	花育 9515 号 Huayu 9515	168	粤油 551 号 Yueyou 551	280	冀花 11 号 Jihua 11
57	花育 9516 号 Huayu 9516	169	粤油 79 号 Yueyou 79	281	冀花 13 号 Jihua 13
58	花育 9517 号 Huayu 9517	170	粤油 92 号 Yueyou 92	282	冀花 16 号 Jihua 16
59	花育 9518 号 Huayu 9518	171	台南 13 号 Tainan 13	283	冀花 18 号 Jihua 18
60	花育 9519 号 Huayu 9519	172	泰花 3 号 Taihua 3	284	冀花 19 号 Jihua 19
61	花育 9520 号 Huayu 9520	173	唐油 4 号 Tangyou 4	285	冀花 21 号 Jihua 21
62	花育 9522 号 Huayu 9522	174	湛油 62 号 Zhanyou 62	286	冀花 572 号 Jihua 572
63	花育 651 号 Huayu 651	175	吉花 13 号 Jihua 13	287	冀花 915 号 Jihua 915
64	花育 652 号 Huayu 652	176	8130	288	冀花 97 号 Jihua 97
65	花育 656 号 Huayu 656	177	白沙 1016 号 Baisha 1016	289	冀农花 3 号 Jinonghua 3
66	花育 657 号 Huayu 657	178	芙蓉花生 Furong huasheng	290	濮花 28 号 Puhua 28
67	花育 658 号 Huayu 658	179	南充扯兜子 Nanchong chedouzi	291	濮花 66 号 Puhua 66
68	花育 659 号 Huayu 659	180	宁海大京生 Ninghai dajingsheng	292	濮花 76 号 Puhua 76
69	5-139	181	日本香香 Japan xiangxiang	293	濮花 86 号 Puhua 86
70	H12	182	余山凤凰窝 Sheshan fenghuangwo	294	琼花 1 号 Qionghua 1
71	H16	183	铁打坚 Tiedajian	295	山花 9 号 Shanhua 9
72	H18	184	印度多粒 India duoli	296	山花 11 号 Shanhua 11
73	H19	185	法库四粒红 Faku silihong	297	山花 18 号 Shanhua 18
74	F18	186	栖霞四粒红 Qixia silihong	298	泰花 11 号 Taihua 11
75	四粒红 Silihong	187	济花 9 号 Jihua 9	299	潍花 15 号 Weihua 15
76	东北王 Dongbeiwang	188	ZZL-GH17	300	潍花 25 号 Weihua 25
77	AT_VC_2	189	桂花 22 号 Guihua 22	301	潍花 28 号 Weihua 28
78	埃及果 Aijiguo	190	桂花 36 号 Guihua 36	302	易花 0910 号 Yihua 0910
79	GXNJP	191	ZZL-GH61	303	宇花 4 号 Yuhua 4

(续表 1)

序号 Number	种质 Germplasm	序号 Number	种质 Germplasm	序号 Number	种质 Germplasm
80	GXBDLLR	192	桂花 63 Guihua 63	304	宇花 8 号 Yuhua 8
81	桂花红 166 Guihuahong 166	193	桂花 1026 Guihua 1026	305	宇花 31 Yuhua 31
82	THS	194	中花 6 号 Zhonghua 6	306	宇花 32 Yuhua 32
83	THS-JL	195	中花 16 Zhonghua 16	307	宇花 33 Yuhua 33
84	济花 501 Jihua 501	196	中花 24 Zhonghua 24	308	宇花 625 Yuhua 625
85	开农 1715 Kainong 1715	197	豫花 23 Yuhua 23	309	宇花 671 Yuhua 671
86	开农 69 Kainong 69	198	豫花 47 号 Yuhua 47	310	宇花 208 Yuhua 208
87	冀花 16 Jihua 16	199	豫花 93 号 Yuhua 93	311	中花 12 Zhonghua 12
88	花育 917 Huayu 917	200	ZZL-YH168	312	冀油 4 号 Jiyou 4
89	FDLYL	201	豫花 133 号 Yuhua 133	313	白沙 Baisha
90	扒拉克 Balake	202	豫花 9326 Yuhua 9326	314	金坠 Jinzhui
91	宇花 1 号 Yuhua 1	203	豫航花 1 号 Yuhanghua 1	315	云南四粒紫 Yunnan silizi
92	AM-C1801_H_924	204	ZZL-YH	316	GDELH
93	AM-C1801_H_952	205	益花 1 号 Yihua 1	317	GDSC
94	AM-C1801_H_1012	206	ZZL-YH1902	318	吉花 19 Jihua 19
95	AM-C1801_H_1028	207	蜀花 4 号 Shuhua 4	319	NMP
96	AM-Tifrunner	208	蜀花 3 号 Shuhua 3	320	NMR
97	AM-SSD6-2	209	蜀花 2 Shuhua 2	321	恩施两粒红 Enshi lianglihong
98	AM-N6	210	ZZL-QH6	322	狮头企 Shitouqi
99	AM-N8	211	泉花 7 号 Quanhua 7	323	巨野小花生 Juye xiaohuasheng
100	AM-N9	212	ZZL-QH8	324	汶上爬蔓花生 Wenshangpaman huasheng
101	AM-N4	213	ZZL- QH10	325	伏花生 Fuhuasheng
102	AM-N3	214	ZZL-QH327	326	霸王鞭 Bawangbian
103	AM-C76	215	泉花 557 Quanhua 557	327	威海大粒墩 Weihai dalidun
104	AM-C76-16	216	黔花 8 Qianhua 8	328	HNHY25
105	AM-NM Valencia A	217	黔花 9 Qianhua 9	329	花育 60 Huayu 60
106	AM-C1501-46	218	开农 61 Kainong 61	330	花育 910 Huayu 910
107	AM-Florunner	219	开农 64 Kainong 64	331	花育 9125 Huayu 9125
108	AM-N7	220	ZZL-KN301		
109	AM-G1	221	冀农花 7 Jinonghua 7		
110	AM-C5	222	冀农花 12 Jinonghua 12		
111	AM-C1801_H_1042	223	冀农花 9 Jinonghua 9		
112	AM-F07	224	仲恺花 12 Zhongkaihua 12		

表中加粗的为美国耐盐种质。Salt-tolerant germplasms from USA are bolded.

1.2 试验方法

选取 40 粒籽粒饱满、大小均匀的花生种子，置于铺有双层滤纸的培养皿中，在人工培养箱(28℃)内进行黑暗培养。3 d 后，挑选芽长一致、生长状态良好的花生幼苗，移栽至 2 个装水的发芽盒中，在人工气候室(28℃)培养约 1 周。培养条件为光照/黑暗(14 h/10 h)，温度 28~30℃。待幼苗生长至两叶一心时

期，分别施加 0 和 1% NaCl 溶液处理^[5]。之后每 2 d 更换 1 次盐溶液及清水，处理 1 周。从每个种质、每个处理中均选取长势相近的 3 株花生幼苗，分别测定 SPAD 值、苗高、地上鲜重、地下鲜重，计算鲜重根冠比。于 120℃烘干后测定地上干重及地下干重(表 2)，并计算干重根冠比。本试验设置 3 次生物学重复。花生耐盐性指标：耐盐系数=盐处理值/对照值。

表 2 各指标性状测定描述
Table 2 Description of traits determined by each indicator

性状 Trait	测定方法 Measurement method
叶绿素含量 SPAD	用 SPAD-502 Plus 测定倒三叶小叶片的 SPAD 值 Measure the SPAD value of the inverted three-leaf small leaves using the SPAD-502 Plus
苗高 PH (cm)	用直尺测量主茎顶端到子叶节的距离 Measure the distance from the tip of the main stem to the cotyledon node
地上鲜重 SFW (g)	用分析天平称量根部以上整个幼苗的重量 Weigh the entire seedling above the root using an analytical balance
地下鲜重 RFW (g)	用分析天平称量整个根系的重量 Weigh the entire root using an analytical balance
地上干重 SDW (g)	测完鲜重的幼苗于烘箱烘干, 用分析天平称量干重 After measuring the fresh weight of the seedlings, dry them in an oven and weigh the dry weight using an analytical balance
地下干重 RDW (g)	测完鲜重的根系于烘箱烘干, 用分析天平称量干重 After measuring the fresh weight of the roots, dry them in an oven and weigh the dry weight using an analytical balance
鲜重根冠比 RSFW	根鲜重与地上鲜重的比值 Ratio of root fresh weight to shoot fresh weight
干重根冠比 RSDW	根干重与地上干重的比值 Ratio of root dry weight to shoot dry weight

SPAD: chlorophyll content; PH: plant height; SFW: shoot fresh weight; RFW: root fresh weight; SDW: shoot dry weight; RDW: root dry weight; RSFW: root shoot fresh weight; RSDW: root shoot dry weight.

1.3 数据处理及作图

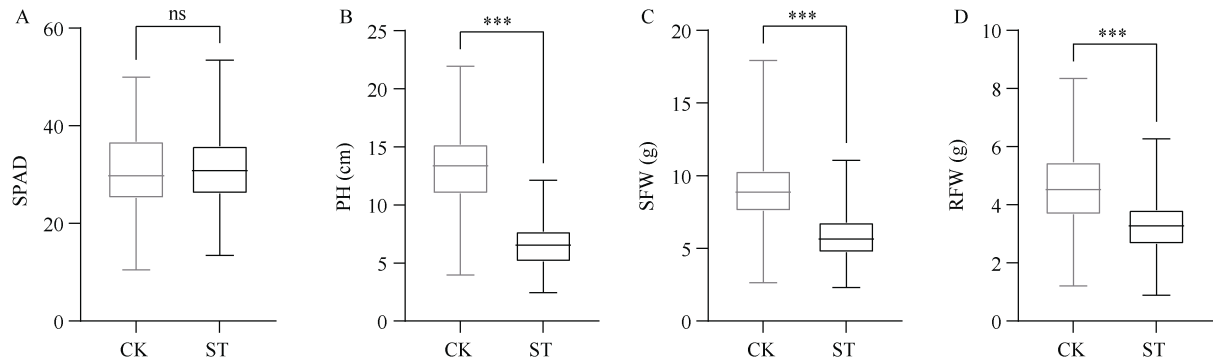
为消除不同种质基础性状间的差异, 采用多个指标的耐盐系数对耐盐性进行评价。利用 Excel 2020 统计各测量指标数据, 使用 SPSS 25 软件、Origin 2024 进行相关性分析、主成分分析、隶属函数分析、聚类分析和多元回归分析。参照段雅娟等^[19]的方法利用隶属函数法进行花生耐盐性综合评价。

2 结果与分析

2.1 盐胁迫下花生苗期性状的变异分析

与对照组相比, 1%盐胁迫下 331 份花生种质的苗高、地上鲜重、地下鲜重及地上干重均显著降低, 但鲜重及干重根冠比显著升高(图 1)。对 8 个性状的耐盐

系数进行统计分析, 相对叶绿素含量、相对苗高、相对地上鲜重、相对地下鲜重、相对地上干重、相对地下干重、相对鲜重根冠比和相对干重根冠比的平均值依次为 1.05、0.51、0.65、0.74、0.80、1.04、1.16 和 1.42, 且所有性状均存在耐盐系数> 1.00 的种质(表 3)。这些性状的变异系数分别为 23.81%、19.60%、24.62%、29.73%、36.25%、33.65%、22.41%和 40.85%。其中相对干重根冠比的变异系数最大, 相对苗高变异系数最小。图 2 表明, 所有性状耐盐系数均呈连续分布, 相对苗高符合正态分布, 其余性状则为偏态分布。相对地下鲜重、相对地下干重、相对鲜重根冠比与相对干重根冠比间存在显著正相关; 而相对地上干重与相对鲜重根冠比、相对干重根冠比间呈显著负相关(图 3)。



(图 1)

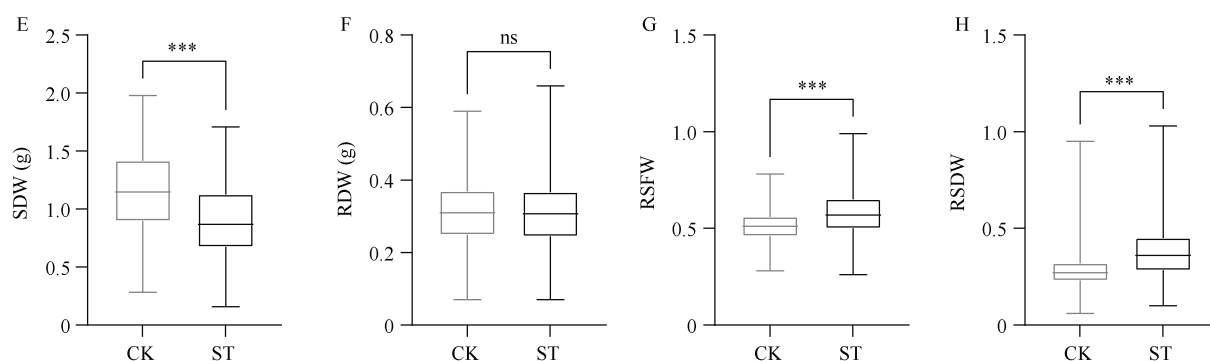


图 1 盐胁迫与对照表型性状显著性分析

Fig. 1 Significance analysis of phenotypic traits under salt stress and control conditions

CK: 对照; ST: 盐胁迫; ***, $P < 0.001$; ns: 不显著。SPAD: 叶绿素含量; PH: 苗高; SFW: 地上鲜重; RFW: 地下鲜重; SDW: 地上干重; RDW: 地下干重; RFW: 鲜重根冠比; RSDW: 干重根冠比。

CK: normal condition; ST: salt stress; ***, $P < 0.001$; ns: no significance. SPAD: chlorophyll content; PH: plant height; SFW: shoot fresh weight; RFW: root fresh weight; SDW: shoot dry weight; RDW: root dry weight; RFW: fresh weight root/shoot ratio; RSDW: dry weight root/shoot ratio.

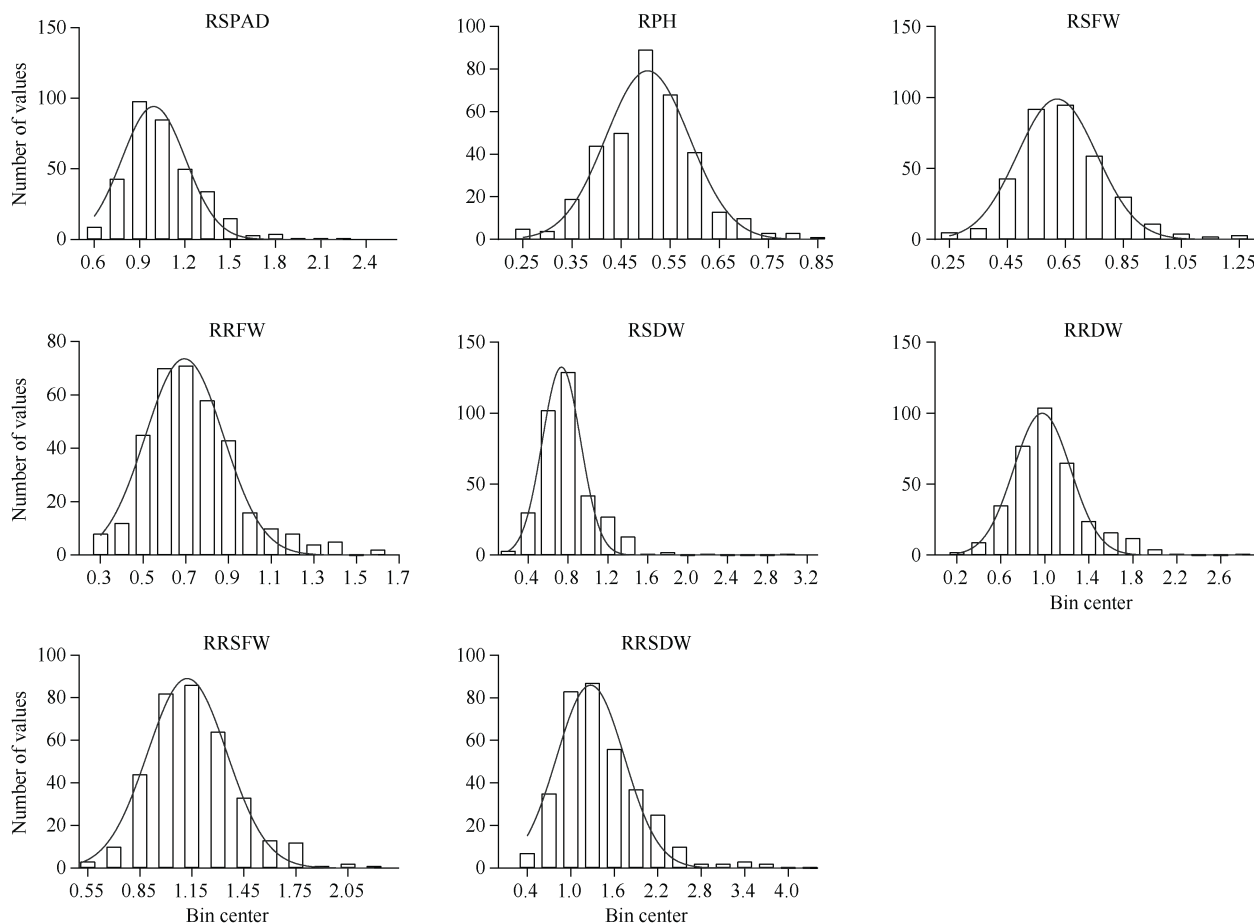


图 2 331 份花生种质耐盐系数指标频率分布

Fig. 2 Frequency distribution of salt tolerance coefficient indices in 331 peanut germplasms

RSPAD: 相对叶绿素含量; RPH: 相对苗高; RFW: 相对地上鲜重; RRFW: 相对地下鲜重; RSDW: 相对地上干重; RRDW: 相对地下干重; RRSFW: 相对鲜重根冠比; RRSWD: 相对干重根冠比。

RSPAD: relative chlorophyll content; RPH: relative plant height; RFW: relative shoot fresh weight; RRFW: relative root fresh weight; RSDW: relative shoot dry weight; RRDW: relative root dry weight; RRSFW: relative fresh weight root/shoot ratio; RRSWD: relative dry weight root/shoot ratio.

表 3 供试材料各指标耐盐变异分析
Table 3 Variation analysis of salt tolerance indices in the tested peanut germplasms

指标 Trait	最大值 Max.	最小值 Min.	极差 Range	均值 Average	标准偏差 SD	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	变异系数 CV (%)
相对叶绿素含量 RSPAD	2.18	0.58	1.60	1.05	0.25	1.13	2.24	23.81
相对苗高 RPH	0.87	0.24	0.63	0.51	0.10	0.21	0.74	19.60
相对地上鲜重 RSFW	1.24	0.25	0.99	0.65	0.16	0.67	1.57	24.62
相对地下鲜重 RRFW	1.62	0.25	1.37	0.74	0.22	0.88	1.49	29.73
相对地上干重 RSDW	3.04	0.15	2.89	0.80	0.29	2.19	11.84	36.25
相对地下干重 RRDW	2.90	0.22	2.68	1.04	0.35	1.28	4.07	33.65
相对鲜重根冠比 RRSFW	2.20	0.42	1.78	1.16	0.26	0.59	0.86	22.41
相对干重根冠比 RRSDW	4.49	0.35	4.14	1.42	0.58	1.39	3.54	40.85

缩写同图 2。Abbreviations are the same as those given in Fig. 2. CV: coefficient of variation.

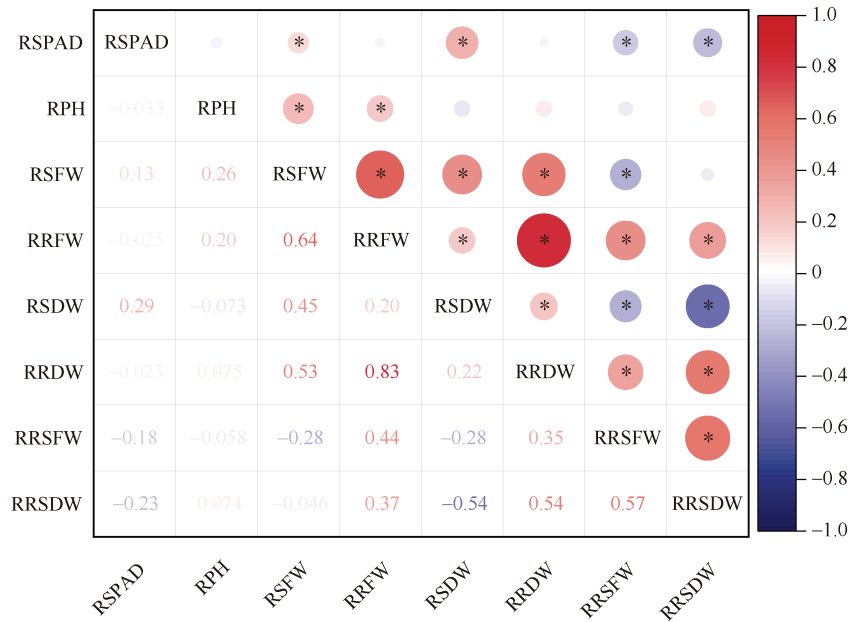


图 3 331 份花生种质 8 个性状耐盐系数相关性分析
Fig. 3 Correlation analysis of eight salt tolerance coefficient traits in 331 peanut germplasms
缩写同图 2。*: $P < 0.05$ 。

Abbreviations are the same as those given in Fig. 2. *: $P < 0.05$.

2.2 花生种质主成分分析及苗期耐盐鉴定指标筛选

为筛选花生苗期耐盐性关键指标,对 331 份种质的 8 个性状进行主成分分析(表 4)。依据特征值 > 1 原则及载荷矩阵,8 个性状归并为 3 个主成分(PC1、PC2、PC3),累计贡献率 76.22%。其中 PC1 贡献率最高(34.64%),PC2 为 27.82%,PC3 为 13.76%(表 4)。PC1 中相对地下鲜重与干重载荷较高(> 0.850),PC2 中相对地上干重载荷突出,PC3 中相对鲜重根冠比贡献显著。

基于试验周期与指标多样性,采用多元回归分析构建花生苗期耐盐性评价模型。以单项耐盐系数

为比较序列,基于主成分分析结果计算各主成分隶属函数值,获得种质 D 值(附表 1)作为参考序列建立回归方程。逐步回归显示,当仅纳入相对地下鲜重(X_4)时,判定系数 $R^2 = 0.625$ ($P < 0.01$),表明模型具良好解释能力(表 5)。随自变量增加, R^2 逐步提升至 0.999 (6 个变量时),所有模型 F 检验均达极显著水平($P < 0.01$),表明最优方程可有效评价耐盐性。最终模型为 $Y = 0.032 + 0.163X_4 + 0.137X_3 + 0.073X_1 - 0.158X_2 + 0.111X_5 + 0.080X_6$ 。方程中 Y 代表 D 值, X_1 为相对叶绿素含量, X_2 为相对苗高, X_3 为相对地上鲜重, X_4 为相对地下鲜重, X_5 为相对地上干重, X_6 为相对地下干重。该模型显示相对地下鲜重(X_4)对盐胁迫敏感性

最高(系数绝对值最大), 其次是相对苗高。综合主成分分析、相关性分析和回归分析表明, 相对苗高、相对地下干重和相对地上干重可作为花生苗期简单、直观的耐盐评价指标。

2.3 聚类分析

基于 D 值, 采用欧氏距离法对 331 份种质进行聚类分析(图 4), 按分枝拓扑结构划分为 5 类: 强耐盐型、耐盐型、中间型、盐敏感型及高盐敏感型。

第 I 类(强耐盐型)含 11 份材料(如华实 2 等), 占比 3.3%, 耐盐性最强。该比例反映耐盐种质资源匮乏。第 II 类(耐盐型)含 33 份材料(如 AM-N4 等), 第 III 类(中间型) 含 104 份材料(如鲁花 11 号等), 第 IV 类(盐敏感型)含 42 份材料, 第 V 类(高盐敏感型)含 141 份材料(占总数 42.6%), 盐敏感性最高。11 份强耐盐种质中, 除相对苗高外的其他 7 个指标, 其耐盐系数均接近或大于 1 (表 6)。

表 4 主成分的特征值、方差贡献率及因子载荷矩阵

Table 4 Principal component analysis of salt tolerance coefficients in 331 peanut germplasms

耐盐指标 Salt tolerance trait	主成分 Principal component		
	第 1 主成分 PC1	第 2 主成分 PC2	第 3 主成分 PC3
相对叶绿素含量 RSPAD	-0.122	0.463	0.312
相对苗高 RPH	0.228	0.122	-0.860
相对地上鲜重 RSFW	0.542	0.708	-0.215
相对地下鲜重 RRFW	0.927	0.213	0.048
相对地上干重 RSDW	0.039	0.831	0.298
相对地下干重 RRDW	0.916	0.149	0.157
相对鲜重根冠比 RRSFW	0.538	-0.593	0.317
相对干重根冠比 RRSBW	0.648	-0.621	-0.031
特征值 Eigen value	2.77	2.23	1.10
贡献率 Contribution ratio (%)	34.64	27.82	13.76
累计贡献率 Cumulative contribution ratio (%)	34.64	62.46	76.22

缩写同图 2。Abbreviations are the same as those given in Fig. 2.

表 5 花生种质资源耐盐数学模型

Table 5 Mathematical model for evaluating salt tolerance in peanut germplasms

多元回归方程 Multiple regression equation	相关系数 r	判定系数 R^2	F 值 F -value	P 值 P -value
$Y = 0.032 + 0.163X_4 + 0.137X_3 + 0.073X_1 - 0.158X_2 + 0.111X_5 + 0.080X_6$	1.000	0.999	70,971.946	≤ 0.001
$Y = 0.044 + 0.144X_4 + 0.103X_3 + 0.136X_5 + 0.082X_6$	0.954	0.911	882.242	≤ 0.001
$Y = 0.102 + 0.157X_5 + 0.176X_6$	0.914	0.835	878.076	≤ 0.001
$Y = 0.084 + 0.082X_4 + 0.238X_3 + 0.108X_6$	0.878	0.771	390.103	≤ 0.001
$Y = 0.095 + 0.229X_4 + 0.226X_3$	0.844	0.712	431.479	≤ 0.001
$Y = 0.165 + 0.333X_4$	0.791	0.625	583.891	≤ 0.001

X_1 : 相对叶绿素含量; X_2 : 相对苗高; X_3 : 相对地上鲜重; X_4 : 相对地下鲜重; X_5 : 相对地上干重; X_6 : 相对地下干重。

X_1 : RSPAD, relative chlorophyll content; X_2 : RPH, relative plant height; X_3 : RSFW, relative shoot fresh weight; X_4 : RRFW, relative root fresh weight; X_5 : RSDW, relative shoot dry weight; X_6 : RRDW, relative root dry weight.

表 6 11 份强耐盐花生种质的耐盐系数

Table 6 Salt tolerance coefficients of eleven highly salt-tolerant peanut germplasms

序号 No.	种质 Germplasm	相对叶绿素含量 RSPAD	相对苗高 RPH	相对地上鲜重 RSFW	相对地下鲜重 RRFW	相对地上干重 RSDW	相对地下干重 RRDW	相对鲜重根冠比 RRSFW	相对干重根冠比 RRSDW
135	AM-Georgianic	0.84	0.49	0.91	1.21	1.29	2.00	1.33	1.55
194	中花 6 Zhonghua 6	0.95	0.56	1.09	1.25	1.25	1.73	1.15	1.38
219	开农 64 Kainong 64	1.05	0.52	1.24	1.38	0.89	1.61	0.82	0.80
223	冀农 9 Jinong 9	0.98	0.39	0.84	0.79	0.86	1.24	0.92	0.91

(续表 6)

序号 No.	种质 Germplasm	相对叶绿 素含量 RSPAD	相对 苗高 RPH	相对地上 鲜重 RSFW	相对地下 鲜重 RRFW	相对地上 干重 RSDW	相对地下 干重 RRDW	相对鲜重 根冠比 RRSFW	相对干重 根冠比 RRSDW
227	远杂 9847 Yuanza 9847	0.76	0.47	0.94	0.70	0.82	0.90	0.66	0.73
233	华实 2 Huashi 2	1.52	0.56	1.19	1.45	1.15	1.74	1.37	1.57
253	ZZL-GSDLJ	0.77	0.46	0.63	1.41	0.82	1.89	1.27	1.21
265	ZZL-9102-54-2	1.15	0.57	0.97	1.10	1.00	1.73	0.94	1.17
268	ZZL-1202	1.24	0.57	1.06	1.16	1.14	1.56	0.88	1.01
282	冀花 16 号 Jihua 16	0.89	0.52	0.71	0.84	1.10	1.58	0.98	1.13
301	潍花 28 号 Weihua 28	0.89	0.41	0.83	1.42	1.26	1.97	1.31	1.06

缩写同图 2。Abbreviations are the same as those given in Fig. 2.

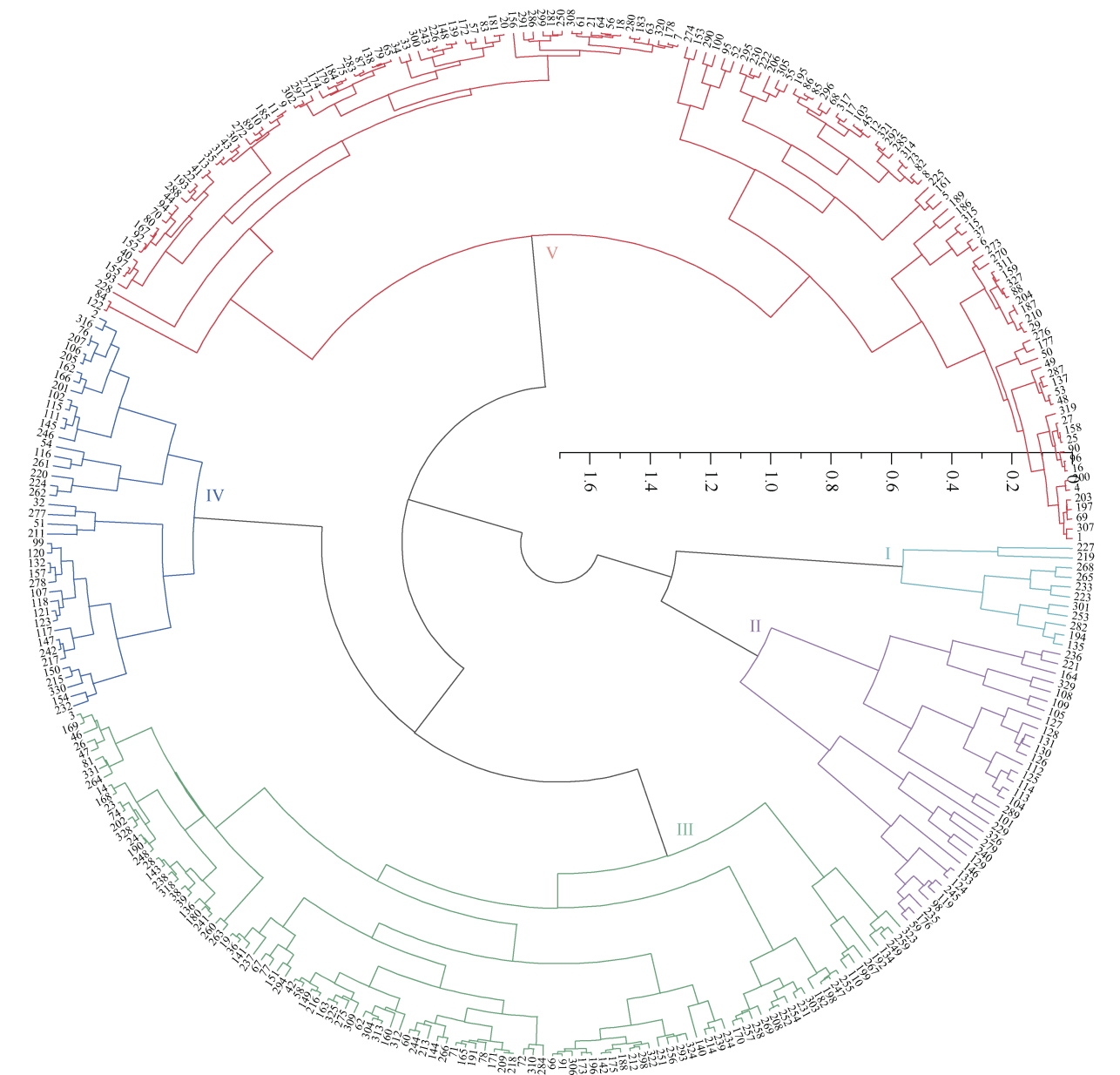


图 4 基于耐盐系数的 331 份花生种质聚类结果
Fig. 4 Clustering results of 331 peanut germplasms based on salt tolerance coefficients

3 讨论

3.1 花生生长对盐胁迫的响应

盐胁迫通过渗透效应和离子毒害(如 K^+/Na^+ 失衡)显著抑制花生种子萌发,并损伤细胞质膜^[9]。本研究中山胁迫显著抑制花生苗期各性状(生物量下降、苗高降低等)。但在 11 份强耐盐种质中,地下鲜重和地下干重表现补偿效应:与对照相当或更高。此现象符合植物逆境响应机制,即通过局部生长补偿实现恢复性生长^[20]。前人研究表明,适度胁迫可诱导短根茎禾草产生补偿性生长^[21],与本研究发现一致。本研究筛选的耐盐种质兼具育种价值与机制研究价值(如根系发育、离子转运等)。鉴于耐盐性可能存在生育期差异,下一步将在盐渍土环境中验证其全生育期耐盐性及产量表现。

3.2 耐盐鉴定指标和分析方法的选择

作为多基因调控的数量性状,耐盐性难以通过单一指标准确表征^[22],需基于多性状整合分析建立评价体系。基于花生苗期 8 个表型性状,整合相关性分析、主成分分析、隶属函数及多元线性回归方法,系统筛选耐盐性鉴定指标。相关性分析表明地下鲜重与干重高度相关($r = 0.83$);主成分分析显示 PC1 主要承载地下生物量信息(载荷> 34.64%),PC2 以地上干重为主导(载荷> 27.82%)。基于耐盐系数与 D 值构建逐步回归模型,最终确定相对苗高、相对地下干重和相对地上干重为最优指标组合。综上,该三维指标体系被确立为花生苗期耐盐性评价核心,与前人筛选出的耐盐指标具有一致性^[10-14]。

盐胁迫环境中,维持或提升根系生物量对植株具多重生理意义,如保障水氮获取效率、促进离子区隔化、维持渗透平衡,并最终支持植株存活与胁迫后恢复。根系作为花生苗期盐胁迫响应的初级屏障,在适应性调节中发挥核心作用。地上干重表征光合系统耐受性及同化物积累状态,其与地下生物量(地下干重)的协同动态可反映源-库平衡维持能力。因此,对筛选出的耐盐种质可重点关注其在盐碱地的根系表型、地下生物量以及与地上生物量的协同动态,以期深入解析花生耐盐的生理及分子机制。

3.3 耐盐种质筛选与育种应用

本研究筛选到 21 份美国耐盐种质和 1 份强耐盐种质,拓展了花生遗传资源,为解决长期以来国内花生育种中存在的种质同质化严重和遗传基础狭窄

问题提供了重要的材料基础。这些引进的耐盐种质不仅丰富了现有花生基因库的遗传多样性,更重要的是为耐盐性状的遗传解析与育种应用带来了新的可能。

未来研究可进一步利用全基因组重测序、转录组分析及群体遗传学方法,深入挖掘这些种质中的耐盐相关等位基因,鉴定关键耐盐 QTL 位点/候选基因。通过与传统栽培品种进行杂交与回交,可将优良耐盐性状高效导入现有主栽品种中,加速耐盐花生新品种的选育进程。此外,结合表型精准鉴定与基因功能验证,有望系统揭示花生耐盐分子机制,为耐盐育种提供理论依据与技术支持。

References

- [1] Liang X Y, Li J F, Yang Y Q, et al. Designing salt stress-resilient crops: current progress and future challenges. *J Integr Plant Biol*, 2024, 66: 303–329.
- [2] Munns R, Tester M. Mechanisms of salinity tolerance. *Annu Rev Plant Biol*, 2008, 59: 651–681.
- [3] Ray D K, Mueller N D, West P C, et al. Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050. *PLoS One*, 2013, 8: e66428.
- [4] Li X G, Pang Y T, Zhong Y W, et al. GmGSTU23 encoding a tau class glutathione S-transferase protein enhances the salt tolerance of soybean (*Glycine max* L.). *Int J Mol Sci*, 2023, 24: 5547.
- [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: 837–845.
Yang J S. Development and prospect of the research on salt-affected soils in China. *Acta Pedol Sin*, 2008, 45: 837–845 (in Chinese with English abstract).
- [6] 乔征岩, 于森, 唐玉劫, 等. 粒用高粱幼苗期耐苏打盐碱综合评价与指标鉴定. *中国农业科学*, 2025, 58: 30–49.
Qiao Z Y, Yu M, Tang Y J, et al. Comprehensive evaluation for soda salinity and alkalinity in sorghum seedling stage and selection of indicators. *Sci Agric Sin*, 2025, 58: 30–49 (in Chinese with English abstract).
- [7] 高建明, 夏卜贤, 袁庆华, 等. 高粱种质材料幼苗期耐盐碱性评价. *应用生态学报*, 2012, 23: 1303–1310.
Gao J M, Xia B X, Yuan Q H, et al. Salt-alkaline tolerance of sorghum germplasm at seedling stage. *Chin J Appl Ecol*, 2012, 23: 1303–1310 (in Chinese with English abstract).
- [8] Dargan K S, Abrol I P, Bhumbla D R. Performance of rice varieties in a highly saline sodic soil as influenced by plant population. *Agron J*, 1974, 66: 279–280.
- [9] 韩毅强, 高亚梅, 杜艳丽, 等. 大豆耐盐碱种质资源鉴定. *中国油料作物学报*, 2021, 43: 1016–1024.
Han Y Q, Gao Y M, Du Y L, et al. Identification of saline-alkali tolerant germplasm resources of soybean during the whole growth stage. *Chin J Oil Crop Sci*, 2021, 43: 1016–1024 (in Chinese with English abstract).

[10] 刘永惠, 沈一, 陈志德, 等. 不同花生品种(系)萌发期耐盐性的鉴定与评价. 中国油料作物学报, 2012, 34: 168–173.
Liu Y H, Shen Y, Chen Z D, et al. Identification of salt tolerance in peanut varieties/lines at the germination stage. Chin J Oil Crop Sci, 2012, 34: 168–173 (in Chinese with English abstract).

[11] 李晓婷, 胡畅丽, 李鑫, 等. 花生萌发期耐盐性鉴定及耐盐种质筛选. 花生学报, 2022, 51(4): 35–43.
Li X T, Hu C L, Li X, et al. Identification and screening of salt-tolerance peanut cultivars during germination stage. J Peanut Sci, 2022, 51(4): 35–43 (in Chinese with English abstract).

[12] 苗华荣, 杨伟强, 胡晓辉, 等. 盐胁迫下花生幼苗期相关性状的 QTL 分析. 华北农学报, 2018, 33(3): 113–118.
Miao H R, Yang W Q, Hu X H, et al. QTL analysis on seedling stage traits of peanut under salt stress. Acta Agric Boreali-Sin, 2018, 33(3): 113–118 (in Chinese with English abstract).

[13] 王亮, 王睿, 朱金成, 等. 50 份花生品种幼苗期耐盐性分析. 作物杂志, 2025(5): 35: 35–41.
Wang L, Wang R, Zhu J C, et al. Analysis on salt tolerance of 50 peanut varieties at seedling stage. Crops, 2025(5): 35: 35–41 (in Chinese with English abstract).

[14] 李晶晶, 王金秀, 曹议丹, 等. 高油酸花生萌发期和苗期耐盐碱性鉴定及评价. 中国农学通报, 2024, 40(15): 44–52.
Li J J, Wang J X, Cao Y D, et al. Peanut with high oleic acid content: identification and evaluation of salt-alkaline tolerance during germination and seedling stage. Chin Agric Sci Bull, 2024, 40(15): 44–52 (in Chinese with English abstract).

[15] 孙东雷, 卞能飞, 陈志德, 等. 花生萌发期耐盐性综合评价及耐盐种质筛选. 植物遗传资源学报, 2017, 18: 1079–1087.
Sun D L, Bian N F, Chen Z D, et al. Comprehensive evaluation of salt tolerance and screening for salt tolerant accessions of peanut (*Arachis hypogaea* L.) at germination stage. J Plant Genet Resour, 2017, 18: 1079–1087 (in Chinese with English abstract).

[16] 沈一, 刘永惠, 陈志德, 等. 花生幼苗期耐盐品种的筛选与评价. 花生学报, 2012, 41(1): 10–15.
Shen Y, Liu Y H, Chen Z D, et al. Selection and evaluation of peanut varieties based on seedling salt tolerance. J Peanut Sci, 2012, 41(1): 10–15 (in Chinese with English abstract).

[17] 慈敦伟, 丁红, 张智猛, 等. 花生耐盐性评价方法的比较与应用. 花生学报, 2013, 42(2): 28–35.
Ci D W, Ding H, Zhang Z M, et al. Comparison and application of different evaluation methods on peanut salt tolerance. J Peanut Sci, 2013, 42(2): 28–35 (in Chinese with English abstract).

[18] 陈杨, 吕玉英, 杨会, 等. 水培法鉴定花生苗期耐盐性研究. 山东农业科学, 2019, 51(9): 125–131.
Chen Y, Lyu Y Y, Yang H, et al. Study on salt tolerance identification of peanut at seedling stage by hydroponics. Shandong Agric Sci, 2019, 51(9): 125–131 (in Chinese with English abstract).

[19] 段雅娟, 曹士亮, 于滔, 等. 玉米自交系萌发期耐盐性鉴定. 作物杂志, 2022(1): 213–219.
Duan Y J, Cao S L, Yu T, et al. Identification of salt tolerance during germination of maize inbred lines. Crops, 2022(1): 213–219 (in Chinese with English abstract).

[20] 温刘君, 朴顺姬, 易津. 4 种小麦族牧草种子耐盐补偿生长特性研究. 中国草地学报, 2009, 31(6): 30–32.
Wen L J, Piao S J, Yi J. Studies on the salt tolerance compensatory growth characteristics of four triticeae accessions' seeds. Chin J Grassland, 2009, 31(6): 30–32 (in Chinese with English abstract).

[21] 白玉娥. 根茎类禾草耐盐性评价及生理基础的研究. 内蒙古农业大学博士学位论文, 内蒙古呼和浩特, 2004.
Bai Y E. Assessment of Salt Tolerance and Physiology Basis of Rhizomatose Grass. PhD Dissertation of Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia, China, 2004 (in Chinese with English abstract).

[22] 马晓军, 金峰学, 杨姗, 等. 作物耐盐碱数量性状基因座(QTL)定位. 分子植物育种, 2015, 13: 221–227.
Ma X J, Jin F X, Yang S, et al. Mapping QTLs for salt & alkaline tolerance in crops. Mol Plant Breed, 2015, 13: 221–227 (in Chinese with English abstract).

附表 1 331 份供试花生种质隶属函数值、D 值
Table S1 Values of subordinative function and D-values of 331 peanut resources tested

序号 Number	隶属函数值 Subordinative function value			D 值 D-value	序号 Number	隶属函数值 Subordinative function value			D 值 D-value
	μ_1	μ_2	μ_3			μ_1	μ_2	μ_3	
1	0.54	0.42	0.50	0.49	167	0.33	0.32	0.59	0.38
2	0.24	0.37	0.66	0.37	168	0.34	0.34	0.63	0.39
3	0.31	0.42	0.57	0.40	169	0.30	0.42	0.52	0.38
4	0.69	0.28	0.73	0.55	170	0.24	0.22	0.53	0.29
5	0.29	0.44	0.62	0.41	171	0.33	0.32	0.61	0.38
6	0.32	0.34	0.71	0.40	172	0.39	0.34	0.37	0.37
7	0.48	0.19	0.41	0.36	173	0.34	0.31	0.55	0.37
8	0.36	0.27	0.61	0.37	174	0.39	0.12	0.64	0.34
9	0.57	0.18	0.40	0.40	175	0.50	0.34	0.61	0.46
10	0.82	0.10	0.53	0.50	176	0.24	0.53	0.34	0.36
11	0.54	0.18	0.41	0.39	177	0.62	0.48	0.71	0.58
12	0.44	0.33	0.62	0.43	178	0.55	0.22	0.50	0.42

(续附表 1)

序号 Number	隶属函数值 Subordinative function value			D 值 D-value	序号 Number	隶属函数值 Subordinative function value			D 值 D-value
	μ_1	μ_2	μ_3			μ_1	μ_2	μ_3	
13	0.34	0.40	0.32	0.36	179	0.53	0.03	0.56	0.35
14	0.29	0.22	0.79	0.35	180	0.23	0.25	0.31	0.25
15	0.51	0.18	0.74	0.43	181	0.34	0.29	0.50	0.35
16	0.50	0.29	0.58	0.44	182	0.39	0.38	0.52	0.41
17	0.29	0.30	0.60	0.35	183	0.45	0.14	0.50	0.35
18	0.49	0.18	0.55	0.39	184	0.48	0.08	0.50	0.34
19	0.37	0.48	0.55	0.44	185	0.46	0.26	0.37	0.37
20	0.35	0.27	0.45	0.34	186	0.45	0.48	0.31	0.43
21	0.50	0.09	0.80	0.41	187	0.96	0.25	0.66	0.65
22	0.38	0.32	0.47	0.37	188	0.55	0.25	0.79	0.48
23	0.30	0.33	0.65	0.37	189	0.70	0.62	0.37	0.61
24	0.34	0.31	0.64	0.38	190	0.38	0.34	0.74	0.43
25	0.54	0.26	0.67	0.46	191	0.38	0.25	0.87	0.42
26	0.29	0.45	0.29	0.35	192	0.19	0.12	0.58	0.24
27	0.47	0.32	0.56	0.43	193	0.40	0.38	0.44	0.40
28	0.27	0.33	0.40	0.31	194	0.69	0.68	0.47	0.64
29	0.59	0.33	0.42	0.46	195	0.51	0.45	0.29	0.45
30	0.54	0.36	0.31	0.43	196	0.36	0.35	0.53	0.39
31	0.67	0.30	0.52	0.51	197	0.56	0.40	0.47	0.49
32	0.29	0.54	0.16	0.36	198	0.22	0.07	0.48	0.21
33	0.23	0.22	0.38	0.25	199	0.22	0.35	0.62	0.34
34	0.35	0.22	0.30	0.29	200	0.68	0.38	0.54	0.55
35	0.53	0.32	0.39	0.43	201	0.47	0.57	0.40	0.50
36	0.38	0.50	0.53	0.45	202	0.32	0.36	0.55	0.38
37	0.53	0.48	0.54	0.51	203	0.63	0.34	0.61	0.52
38	0.32	0.36	0.46	0.36	204	1.00	0.25	0.83	0.70
39	0.42	0.36	0.58	0.43	205	0.35	0.43	0.48	0.40
40	0.38	0.38	0.37	0.38	206	0.46	0.45	0.45	0.45
41	0.33	0.38	0.44	0.37	207	0.25	0.41	0.65	0.38
42	0.31	0.43	0.41	0.37	208	0.23	0.16	0.70	0.29
43	0.59	0.32	0.42	0.46	209	0.31	0.33	0.72	0.39
44	0.39	0.27	0.41	0.35	210	0.55	0.30	0.72	0.49
45	0.48	0.40	0.52	0.46	211	0.28	0.52	0.41	0.39
46	0.37	0.50	0.57	0.45	212	0.50	0.29	0.50	0.42
47	0.23	0.45	0.51	0.36	213	0.35	0.39	0.38	0.37
48	0.65	0.24	0.59	0.49	214	0.45	0.42	0.34	0.42
49	0.69	0.39	0.31	0.51	215	0.31	0.48	0.47	0.40
50	0.87	0.53	0.61	0.70	216	0.36	0.43	0.34	0.39
51	0.42	0.66	0.09	0.44	217	0.19	0.46	0.48	0.34
52	0.50	0.47	0.39	0.47	218	0.39	0.38	0.52	0.41
53	0.86	0.20	0.60	0.57	219	0.65	0.77	0.39	0.65
54	0.26	0.51	0.09	0.32	220	0.08	0.24	0.50	0.22
55	0.42	0.46	0.43	0.43	221	0.09	0.38	0.56	0.28

(续附表 1)

序号 Number	隶属函数值 Subordinative function value			D 值 D-value		序号 Number	隶属函数值 Subordinative function value			D 值 D-value
	μ_1	μ_2	μ_3				μ_1	μ_2	μ_3	
56	0.55	0.11	0.54	0.38		222	0.45	0.44	0.58	0.47
57	0.47	0.38	0.25	0.40		223	0.40	0.53	0.61	0.48
58	0.33	0.44	0.43	0.39		224	0.07	0.28	0.63	0.25
59	0.26	0.57	0.38	0.40		225	0.42	0.54	0.53	0.48
60	0.31	0.33	0.48	0.35		226	0.23	0.20	0.52	0.27
61	0.55	0.15	0.58	0.41		227	0.32	0.57	0.36	0.42
62	0.25	0.40	0.41	0.33		228	0.34	0.42	0.51	0.40
63	0.62	0.09	0.56	0.42		229	0.36	0.69	0.00	0.42
64	0.59	0.15	0.56	0.42		230	0.50	0.50	0.36	0.47
65	0.39	0.38	0.52	0.41		231	0.26	0.10	0.55	0.25
66	0.33	0.29	0.45	0.34		232	0.31	0.47	0.70	0.44
67	0.33	0.38	0.67	0.41		233	0.77	0.73	0.59	0.72
68	0.43	0.39	0.34	0.40		234	0.53	0.44	0.54	0.50
69	0.50	0.31	0.55	0.44		235	0.15	0.52	0.60	0.37
70	0.39	0.38	0.52	0.41		236	0.23	0.54	0.74	0.43
71	0.28	0.26	0.86	0.38		237	0.55	0.56	0.67	0.58
72	0.40	0.44	0.29	0.39		238	0.23	0.27	0.46	0.29
73	0.41	0.37	0.58	0.42		239	0.34	0.28	0.50	0.35
74	0.26	0.32	0.64	0.35		240	0.32	0.74	0.60	0.52
75	0.54	0.06	0.55	0.37		241	0.20	0.23	0.50	0.26
76	0.39	0.38	0.52	0.41		242	0.15	0.43	0.71	0.35
77	0.39	0.38	0.52	0.41		243	0.36	0.21	0.53	0.34
78	0.35	0.38	0.62	0.41		244	0.38	0.34	0.57	0.40
79	0.48	0.12	0.69	0.39		245	0.12	0.54	0.60	0.36
80	0.43	0.38	0.40	0.41		246	0.37	0.49	0.80	0.49
81	0.30	0.43	0.42	0.37		247	0.24	0.00	0.62	0.22
82	0.34	0.33	0.67	0.39		248	0.38	0.34	0.64	0.41
83	0.33	0.22	0.34	0.29		249	0.39	0.42	0.62	0.45
84	0.39	0.38	0.52	0.41		250	0.24	0.22	0.57	0.29
85	0.45	0.38	0.56	0.44		251	0.33	0.16	0.69	0.33
86	0.41	0.41	0.52	0.43		252	0.29	0.14	0.79	0.32
87	0.32	0.20	0.49	0.31		253	0.65	0.41	0.64	0.56
88	0.61	0.43	0.34	0.49		254	0.30	0.11	0.99	0.35
89	0.59	0.19	0.25	0.38		255	0.31	0.00	0.74	0.27
90	0.41	0.37	0.39	0.39		256	0.44	0.17	0.83	0.42
91	0.40	0.30	0.49	0.38		257	0.34	0.09	0.85	0.34
92	0.45	0.37	0.48	0.42		258	0.23	0.21	0.53	0.28
93	0.50	0.47	0.24	0.44		259	0.44	0.49	0.62	0.49
94	0.57	0.31	0.30	0.42		260	0.40	0.48	0.34	0.42
95	0.48	0.47	0.22	0.43		261	0.24	0.45	0.28	0.33
96	0.54	0.31	0.46	0.44		262	0.23	0.40	0.44	0.33
97	0.45	0.41	0.32	0.41		263	0.45	0.44	0.42	0.44
98	0.18	0.70	0.52	0.43		264	0.34	0.49	0.36	0.39

(续附表 1)

序号 Number	隶属函数值 Subordinative function value			D 值 D-value		序号 Number	隶属函数值 Subordinative function value			D 值 D-value
	μ_1	μ_2	μ_3				μ_1	μ_2	μ_3	
99	0.44	0.64	0.51	0.52		265	0.59	0.65	0.44	0.59
100	0.55	0.53	0.40	0.51		266	0.31	0.31	0.49	0.35
101	0.55	0.67	0.85	0.65		267	0.21	0.25	0.68	0.31
102	0.26	0.40	0.68	0.39		268	0.58	0.75	0.44	0.62
103	0.43	0.36	0.70	0.45		269	0.25	0.20	0.54	0.28
104	0.31	0.59	0.86	0.51		270	0.75	0.31	0.42	0.53
105	0.51	1.00	1.00	0.78		271	0.26	0.06	0.22	0.18
106	0.33	0.42	0.50	0.39		272	0.31	0.24	0.31	0.28
107	0.25	0.58	0.88	0.48		273	0.67	0.44	0.56	0.56
108	0.27	0.63	0.51	0.44		274	0.36	0.44	0.31	0.38
109	0.44	0.90	0.87	0.69		275	0.29	0.36	0.44	0.34
110	0.26	0.27	0.75	0.35		276	0.45	0.39	0.49	0.43
111	0.37	0.55	0.58	0.47		277	0.34	0.53	0.37	0.41
112	0.33	0.44	0.75	0.45		278	0.36	0.62	0.62	0.50
113	0.38	0.55	0.74	0.50		279	0.44	0.70	0.43	0.53
114	0.32	0.52	0.66	0.45		280	0.41	0.16	0.38	0.31
115	0.32	0.49	0.58	0.43		281	0.40	0.22	0.50	0.35
116	0.33	0.60	0.07	0.38		282	0.47	0.52	0.51	0.50
117	0.28	0.59	0.88	0.50		283	0.36	0.18	0.46	0.31
118	0.36	0.69	0.62	0.53		284	0.24	0.37	0.48	0.33
119	0.18	0.60	0.45	0.38		285	0.30	0.33	0.47	0.34
120	0.41	0.65	0.52	0.52		286	0.28	0.12	0.43	0.25
121	0.39	0.38	0.52	0.41		287	0.46	0.23	0.55	0.39
122	0.39	0.38	0.52	0.41		288	0.33	0.37	0.43	0.36
123	0.38	0.71	0.69	0.56		289	0.55	0.58	0.50	0.55
124	0.33	0.68	0.78	0.54		290	0.60	0.42	0.52	0.52
125	0.36	0.59	0.76	0.51		291	0.36	0.18	0.52	0.33
126	0.35	0.59	0.75	0.51		292	0.39	0.36	0.60	0.42
127	0.37	0.53	0.91	0.52		293	0.33	0.15	0.52	0.30
128	0.45	0.62	0.91	0.60		294	0.40	0.45	0.64	0.46
129	0.43	0.90	0.71	0.65		295	0.37	0.37	0.47	0.39
130	0.28	0.56	0.67	0.45		296	0.40	0.40	0.48	0.41
131	0.39	0.68	0.73	0.56		297	0.41	0.11	0.41	0.30
132	0.34	0.59	0.65	0.49		298	0.43	0.30	0.41	0.38
133	0.30	0.62	0.70	0.49		299	0.37	0.27	0.44	0.34
134	0.31	0.37	0.52	0.37		300	0.29	0.26	0.39	0.30
135	0.71	0.57	0.63	0.64		301	0.69	0.59	0.77	0.67
136	0.18	0.28	0.52	0.28		302	0.33	0.07	0.45	0.26
137	0.71	0.12	0.65	—		303	0.26	0.25	0.51	0.30
138	0.43	0.12	0.72	—		304	0.26	0.39	0.37	0.33
139	0.37	0.24	0.46	—		305	0.52	0.55	0.25	0.48
140	0.49	0.51	0.28	—		306	0.40	0.37	0.34	0.38
141	0.39	0.46	0.53	—		307	0.55	0.36	0.48	0.47

(续附表 1)

序号 Number	隶属函数值 Subordinative function value			D 值 D-value		序号 Number	隶属函数值 Subordinative function value			D 值 D-value
	μ_1	μ_2	μ_3				μ_1	μ_2	μ_3	
142	0.49	0.36	0.55	—		308	0.58	0.21	0.60	0.45
143	0.27	0.35	0.43	—		309	0.40	0.44	0.19	0.38
144	0.24	0.30	0.41	—		310	0.33	0.42	0.35	0.37
145	0.30	0.47	0.62	—		311	0.73	0.47	0.39	0.57
146	0.05	0.58	0.68	—		312	0.30	0.39	0.28	0.33
147	0.23	0.48	0.64	—		313	0.33	0.44	0.31	0.37
148	0.36	0.25	0.42	—		314	0.36	0.37	0.54	0.40
149	0.42	0.45	0.40	—		315	0.49	0.35	0.56	0.45
150	0.36	0.54	0.57	—		316	0.27	0.42	0.54	0.37
151	0.42	0.47	0.63	—		317	0.41	0.38	0.56	0.43
152	0.50	0.29	0.58	—		318	0.26	0.32	0.44	0.31
153	0.48	0.51	0.12	—		319	0.60	0.38	0.50	0.50
154	0.37	0.50	0.94	—		320	0.37	0.11	0.56	0.31
155	0.39	0.38	0.52	—		321	0.36	0.34	0.49	0.38
156	0.36	0.29	0.16	—		322	0.40	0.21	0.62	0.37
157	0.29	0.57	0.68	—		323	0.39	0.38	0.52	0.41
158	0.56	0.25	0.62	—		324	0.35	0.19	0.71	0.35
159	0.67	0.42	0.40	—		325	0.25	0.37	0.36	0.31
160	0.29	0.43	0.23	—		326	0.29	0.56	0.43	0.41
161	0.44	0.53	0.51	0.48		327	0.59	0.43	0.50	0.52
162	0.36	0.53	0.30	0.41		328	0.29	0.37	0.59	0.38
163	0.28	0.38	0.29	0.32		329	0.04	0.47	0.76	0.33
164	0.39	0.38	0.52	0.41		330	0.21	0.48	0.70	0.40
165	0.29	0.32	0.64	0.36		331	0.29	0.45	0.20	0.33
166	0.29	0.47	0.47	0.39						