

蝴蝶豆种质资源芽期耐盐性筛选及评价

王燕茹¹, 袁秉琛², 孙郁婷², 王志勇¹, 虞道耿^{3*}

1. 海南大学林学院, 海南海口 570228; 2. 海南大学热带作物学院, 海南海口 570228; 3. 中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所, 海南海口 571101

摘要: 蝴蝶豆作为重要的热带豆科牧草, 研究其耐盐机理, 对选育优良的品种和提高牧草的产量具有十分重要的意义。为研究不同蝴蝶豆 (*Centrosema pubescens*) 种子萌发期耐盐性差异, 以 150 mmol/L 浓度的氯化钠对 75 份蝴蝶豆属种质在萌芽期进行耐盐性鉴定, 测定发芽率、发芽势、根长、芽长和鲜重等 14 个指标, 并进行隶属函数、主成分分析、相关性分析以及聚类分析, 从而对蝴蝶豆种质资源耐盐性进行综合评价, 筛选耐盐种质。结果表明: 盐胁迫浓度在 150 mmol/L 下, 相对根冠比变异系数最大 (67.75%), 可以作为蝴蝶豆耐盐性评价指标之一; 相关性分析展现出蝴蝶豆属种质发芽率、发芽势相关任意 2 个发芽指标之间呈现极显著 ($P<0.01$) 正相关, 其余各类指标相互均存在一定程度的关联性; 本研究中提取了 4 个主成分作为主成分分析的方向, 累积贡献率 83.17%, 可以代替所有指标的大部分信息, 综合反映盐胁迫下蝴蝶豆萌芽期的萌发特性, 并通过载荷矩阵确定发芽指数、相对根冠比、相对发芽率和根冠比为耐盐性评价指标; 对平均隶属函数和综合得分进行耐盐性综合评价, 并基于蝴蝶豆耐盐综合得分值 (Z) 进行聚类, 将 75 份种质资源分为 4 个大类, 其中极耐盐种质 1 份 (050321057 蝴蝶豆)、耐盐种质 17 份、低耐盐种质 7 份、敏盐种质共 50 份。本研究建立的蝴蝶豆耐盐评价体系 and 筛选方法可为蝴蝶豆属耐盐性、耐盐基因筛选等研究提供基础。

关键词: 蝴蝶豆; 相关性分析; 主成分分析; 隶属函数; 聚类分析

中图分类号: S541.9 文献标识码: A

Screening and Evaluation of Salt Tolerance in the Bud Stage of *Centrosema pubescens* Resources

WANG Yanru¹, YUAN Bingchen², SUN Yuting², WANG Zhiyong¹, YU Daogeng^{3*}

1. College of Forestry, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 2. College of Tropical Crops, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China; 3. Tropical Crops Genetic Resources Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China

Abstract: *Centrosema pubescens* is an important tropical leguminous forage. It is of great significance to study the salt tolerance mechanism of the plant for breeding excellent varieties and improving forage yield. In order to study the difference of salt tolerance of different seeds of *C. pubescens* in the germination period, the salt tolerance of 75 germplasm resources was identified in the germination period. NaCl with 150 mmol/L, and 14 indexes such as germination rate, germination potential, root length, bud length and fresh weight were measured, and membership function, principal component analysis, correlation analysis and cluster analysis were carried out to comprehensively evaluate the salt tolerance of germplasm resources of *Centrosema pubescens* and to screening salt tolerant germplasm. Under salt stress concentration of 150 mmol/L, the coefficient of variation of relative root shoot ratio was the highest (67.75%), which could be used as one of the evaluation indicators of salt tolerance. The correlation analysis showed that there was a very significant ($P<0.01$) relationship between any two germination indicators of the germination rate and germination potential, and the other

收稿日期 2022-07-12; 修回日期 2022-08-16

基金项目 海南省农业农村厅物种资源保护项目“海南饲用豆科植物资源保护”(琼财农[2020]829号); 果园间作牧草技术模式研究与示范(No. PZS2022001)。

作者简介 王燕茹(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 牧草资源收集与开发。*通信作者(Corresponding author): 虞道耿(YU Daogeng), E-mail: geng0209@126.com。

indicators were related to each other to a certain extent. Four principal component as the main component analysis of the direction of the cumulative contribution rate of 83.17% could replace most of the information of all indicators, comprehensively reflecting the germination characteristics during germination under salt stress, and determine the germination index, relative root shoot ratio, relative germination rate and root shoot ratio as the evaluation indicators of salt tolerance through the load matrix. The average membership function and comprehensive score were comprehensively evaluated for salt tolerance, and the 75 germplasm resources were divided into four categories by clustering based on the comprehensive score value of salt tolerance (Z), including 1 highly salt tolerant germplasm (*Centrosema* 050321057), 17 salt tolerant germplasm, 7 low salt tolerant germplasm and 50 salt sensitive germplasm. In this study, the salt tolerance evaluation system and material evaluation and screening methods were established, which could provide a basis for the study of salt tolerance and salt tolerance gene screening of the genus.

Keywords: *Centrosema pubescens*; correlation analysis; principal component analysis; membership function; cluster analysis

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.05.011

世界上约 20%的耕地属于盐碱地^[1]。而土壤盐度是降低植物生产力的主要非生物胁迫之一,因此人们生产耐盐作物的必要性显而易见^[2]。目前筛选种植耐盐植物是利用盐碱地最科学高效的方式^[3]。众所周知,植物的耐盐强弱一般随不同物种和不同生长阶段而发生变化^[4]。盐胁迫条件下,植物最敏感的阶段是芽期和苗期^[5]。因而,对芽期或苗期的植物进行耐盐测试,能从大量材料中快速有效地筛选出耐盐种质。盐害主要是土壤可溶性盐分过高改变植物的细胞膜透性,使植物细胞失水,并阻碍植物进行光合作用,对植物的生长不利^[6-7],严重时致死。

蝴蝶豆是豆科距瓣豆属多年生缠绕性草本,具有根深、茎细、叶大、产量高不易木质化等特点,年产鲜茎叶可达 30~45 t/hm²;营养丰富,适口性好,作为青饲料可为各种家畜提供高蛋白,也可晒制成干草^[8],是优良绿肥和覆盖植物、饲料^[9],生长管理粗放能在贫瘠的砖壤土中生长;并且它极其耐旱、耐荫,适口性好,可固氮,能抵御叶斑病和红蜘蛛侵害,抵制杂草入侵,具有极大的种植潜力^[10-15]。目前已在草地早熟禾^[16]、狗牙根^[17]、豇豆^[18]等多种草本、豆科植物的不同生育期开展了耐盐性鉴定与筛选。国内外对蝴蝶豆的研究主要包括其苗期耐盐^[19]、抗旱^[20]、高温胁迫^[21]等一些抗逆性研究,但都未形成可靠有效的评价体系。严琳玲等^[19]对 20 份蝴蝶豆种质材料苗期进行不同盐浓度胁迫,将其分为 2 类:耐盐型种质和不耐盐种质。相对于蝴蝶豆而言耐盐性研究略有欠缺,且作为优质牧草、绿肥能够更加广泛地应用于生产、生活中。故此,评估现有 75 份蝴蝶豆属种质资源的耐盐性强弱,挑选出耐盐种质,大面积种植之后,不仅提高生产量也实

现了高效利用盐碱地的目标。

本研究以 75 份蝴蝶豆属种质为材料,盐胁迫针对芽期做处理,记录相关的形态,并利用隶属函数、主成分分析、聚类分析等评价方法对蝴蝶豆属种质萌芽期耐盐性进行评价,得出鉴定蝴蝶豆耐盐性的最适浓度和筛选耐盐性的指标,并对不同评价方法所得结果进行聚类分析,最终挑选出耐盐性较强的材料。为开发耐盐优异的蝴蝶豆资源和培育耐盐性强的新品种提供材料和理论支持,为前人研究进行补充。

1 材料与amp;方法

1.1 材料

试验所用 75 份蝴蝶豆种质由国家热带牧草种质资源中期(备份)库提供。包括 CIAT 国外引进的资源 and 国内野外收集的资源,共 1 属 3 种 75 份(表 1)。

1.2 方法

1.2.1 盐胁迫浓度确定 从所有距瓣豆属种质资源材料中随机选取 7 份,挑选均匀、饱满、健康的种子。采用培养滤纸法。盐(NaCl)浓度为:0、50、100、150、200、250 mmol/L,以 50 mmol/L 为梯度设置。每浓度处理 3 个重复,每重复种子 30 粒。种子用 75%酒精浸泡 15 min,再用 10%的过氧化氢浸泡 30 s 杀菌、消毒,再用清水清洗,打破种子休眠,待用。将种子均匀地置于 90 mm 的培养皿中,每处理添加 10 mL 对应的盐溶液,放入培养箱中进行恒温培养(25 ℃, 16 h 光照, 8 h 黑暗,光强 4000 lx)。每天记录种子发芽数,第 6 天发芽停止,结束试验,测量其发芽率、发芽势、根长、芽长等。发芽标准:胚根长 \geq 种子长度的 1/2。

表 1 供试材料
Tab. 1 List of accessions used in the study

序号 No.	种质 Germplasm	资源类型 Resource type	地理坐标 Geographic coordinates	来源地 Origin
1	CIAT413 蝴蝶豆	引进栽培	70°W, 2°S	哥伦比亚国际热带农业中心 (CIAT) 引入
2	CIAT15144 蝴蝶豆	引进栽培	70°W, 2°S	哥伦比亚国际热带农业中心 (CIAT) 引入
3	050320009 蝴蝶豆	野生资源	109°41'28"E, 18°42'9"N	海南保亭七仙岭
4	060219018 蝴蝶豆	野生资源	109°5'8"E, 19°3'52"N	海南昌江霸王岭
5	041229005 蝴蝶豆	野生资源	109°30'4"E, 19°30'56"N	海南儋州两院
6	060312011 蝴蝶豆	野生资源	109°10'33"E, 19°25'5"N	海南白沙芙蓉田
7	050319002 蝴蝶豆	野生资源	109°00'E, 18°34'25"N	海南乐东千家镇响水乡
8	050320003 蝴蝶豆	野生资源	110°00'11"E, 18°34'8"N	海南陵水
9	071103014 蝴蝶豆	野生资源	109°30'4"E, 19°30'56"N	海南儋州两院
10	020401049 蝴蝶豆(有花纹)	野生资源	110°12'E, 18°50'N	海南万宁长丰新加
11	181224030 蝴蝶豆	引进资源	102°30'E, 10°30'N	柬埔寨引入
12	020401050 蝴蝶豆(无花纹)	野生资源	110°12'E, 18°50'N	海南万宁长丰新加
13	CIAT15193 蝴蝶豆	引进资源	70°W, 2°S	哥伦比亚国际热带农业中心 (CIAT) 引入
14	060301016 蝴蝶豆	野生资源	109°16'33"E, 18°29'9"N	海南三亚雅亮
15	CIAT5627 蝴蝶豆	引进资源	70°W, 2°S	哥伦比亚国际热带农业中心 (CIAT) 引入
16	050321040 蝴蝶豆	野生资源	109°30'58"E, 18°47'56"N	海南五指山
17	CIAT872 蝴蝶豆	引进资源	70°W, 2°S	哥伦比亚国际热带农业中心 (CIAT) 引入
18	060228011 蝴蝶豆	野生资源	108°54'52"E, 19°6'23"N	海南东方广坝农场
19	181224002 蝴蝶豆	引进资源	102°30'E, 10°30'N	柬埔寨引入
20	050320020 蝴蝶豆	野生资源	110°0'11"E, 18°34'8"N	海南陵水提蒙路边
21	060311007 蝴蝶豆	野生资源	109°1'1"E, 19°8'32"N	海南昌江七差镇
22	CIAT5277 尖叶蝴蝶豆	引进资源	70°W, 2°S	哥伦比亚国际热带农业中心 (CIAT) 引入
23	CIAT5009 蝴蝶豆	引进资源	70°W, 2°S	哥伦比亚国际热带农业中心 (CIAT) 引入
24	CIAT5175 蝴蝶豆	引进资源	70°W, 2°S	哥伦比亚国际热带农业中心 (CIAT) 引入
25	060219003 蝴蝶豆	野生资源	109°1'1"E, 19°17'59"N	海南昌江
26	060301009 蝴蝶豆	野生资源	109°0'E, 18°34'25"N	海南乐东戒毒所公路旁荒地
27	南 00739 蝴蝶豆	引进资源	109°36'E, 18°18'N	海南三亚南繁
28	CIAT15149 蝴蝶豆	引进资源	114°16'E, 30°36'S	哥伦比亚国际热带农业中心 (CIAT) 引入
29	061220030 蝴蝶豆 (有花纹)	野生资源	109°11'29"E, 18°19'15"N	海南三亚天涯海角
30	CIAT5006 草地蝴蝶豆	引进资源	70°W, 2°S	哥伦比亚国际热带农业中心 (CIAT) 引入
31	050320027 蝴蝶豆	野生资源	109°41'28"E, 18°42'8"N	海南保亭什岭
32	CIAT25118 草地蝴蝶豆	引进资源	70°W, 2°S	哥伦比亚国际热带农业中心 (CIAT) 引入
33	CIAT1589 蝴蝶豆	引进资源	70°W, 2°S	哥伦比亚国际热带农业中心 (CIAT) 引入
34	CIAT5113 蝴蝶豆	引进资源	70°W, 2°S	哥伦比亚国际热带农业中心 (CIAT) 引入
35	CIAT15150 蝴蝶豆	引进资源	70°W, 2°S	哥伦比亚国际热带农业中心 (CIAT) 引入
36	171223004 蝴蝶豆	引进资源	102°30'E, 10°30'N	柬埔寨引入
37	041130026 蝴蝶豆	野生资源	109°00'32"E, 19°16'32"N	海南昌江叉河
38	CIAT15474 蝴蝶豆	引进资源	70°W, 2°S	哥伦比亚国际热带农业中心 (CIAT) 引入
39	CIAT5709 蝴蝶豆	引进资源	70°W, 2°S	哥伦比亚国际热带农业中心 (CIAT) 引入
40	CIAT5133 蝴蝶豆	引进资源	70°W, 2°S	哥伦比亚国际热带农业中心 (CIAT) 引入
41	050320026 蝴蝶豆	野生资源	109°41'28"E, 18°42'8"N	海南保亭什岭镇
42	050320004 蝴蝶豆	野生资源	98°52'E, 26°54'N	云南怒江州泸水六库镇
43	CIAT5167 蝴蝶豆	引进资源	70°W, 2°S	哥伦比亚国际热带农业中心 (CIAT) 引入
44	090309014 蝴蝶豆	野生资源	109°0'E, 18°34'25"N	海南乐东县保国农场

续表 1 供试材料
Tab. 1 List of accessions used in the study (continued)

序号 No.	种质 Germplasm	资源类型 Resource type	地理坐标 Geographic coordinates	来源地 Origin
45	050319012 蝴蝶豆	野生资源	109°0'E, 18°34'25"N	海南乐东千家镇响水乡
46	050320027-1 蝴蝶豆(无花纹)	野生资源	109°41'28"E, 18°42'8"N	海南保亭什岭镇
47	CIAT5887 大果蝴蝶豆	引进资源	70°W, 2°S	哥伦比亚国际热带农业中心 (CIAT) 引入
48	060207018 蝴蝶豆	野生资源	109°26'45"E, 19°13'23"N	海南白沙县城
49	13011001 蝴蝶豆	引进资源	109°36'E, 18°18'N	海南三亚南繁
50	101214007 蝴蝶豆	引进资源	2°32' E, 6°20'N	贝宁引入
51	050319008 蝴蝶豆	野生资源	109°1'38"E, 19°17'59"N	海南昌江大坡镇
52	050321038 蝴蝶豆	野生资源	109°41'28"E, 18°42'8"N	海南保亭响水镇什村金边四队
53	Caholillo 蝴蝶豆	引进资源	113°E, 10°S	澳大利亚国际热带农业中心(CIAR)引入
54	南 01971 蝴蝶豆	引进资源	109°36'E, 18°18'N'	海南三亚南繁
55	CIAT5631 蝴蝶豆	引进资源	70°W, 2°S	哥伦比亚国际热带农业中心 (CIAT) 引入
56	CIAT15470 蝴蝶豆	引进资源	70°W, 2°S	哥伦比亚国际热带农业中心 (CIAT) 引入
57	060306029 蝴蝶豆	野生资源	109°34'14"E, 19°1'46"N	海南鹦歌岭
58	CIAT2110 蝴蝶豆	引进资源	70°W, 2°S	哥伦比亚国际热带农业中心 (CIAT) 引入
59	020301004 蝴蝶豆	野生资源	109°44'5"E, 19°26'56"N	海南三亚藤桥
60	081110034 蝴蝶豆	野生资源	98°52'E, 26°54'N	云南怒江州贡山县丙中洛镇
61	CIAT5129 蝴蝶豆	引进资源	70°W, 2°S	哥伦比亚国际热带农业中心 (CIAT) 引入
62	TF01602 大叶蝴蝶豆	野生资源	109°30'2"E, 19°41'54"N	海南儋州两院十队基地
63	060320026-1 蝴蝶豆	野生资源	109°41'28"E, 18°42'8"N	海南保亭什岭镇
64	CIAT 草地蝴蝶豆	引进资源	70°W, 2°S	哥伦比亚国际热带农业中心 (CIAT) 引入
65	130310006 蝴蝶豆	野生资源	116°4'E, 24°11'N	广东梅州市区
66	CIAT15160 蝴蝶豆	引进资源	70°W, 2°S	哥伦比亚国际热带农业中心 (CIAT) 引入
67	071029001 蝴蝶豆	野生资源	109°0'E, 18°34'25"N	海南乐东县
68	050301409 蝴蝶豆	野生资源	101°6'29"E, 21°59'20"N	云南勐腊县
69	050321057 蝴蝶豆	野生资源	109°29'44"E, 19°9'6"N'	海南白沙元门乡
70	041201002 蝴蝶豆	野生资源	100°50'E, 22°01'N	云南景洪东风农场
71	CIAT5596 蝴蝶豆	引进资源	70°W, 2°S	哥伦比亚国际热带农业中心 (CIAT) 引入
72	CIAT2172 蝴蝶豆	引进资源	70°W, 2°S	哥伦比亚国际热带农业中心 (CIAT) 引入
73	060221002 蝴蝶豆	野生资源	109°3' 5"E, 19°25'57"N	海南白沙邦溪镇
74	CIAT15182 蝴蝶豆	引进资源	70°W, 2°S	哥伦比亚国际热带农业中心 (CIAT) 引入
75	060306037 蝴蝶豆	野生资源	109°35'49"E, 19°0'15"N	海南琼中什运

1.2.2 芽期耐盐种质筛选 确定适宜筛选浓度 150 mmol/L, 处理组加入 10 mL 该浓度盐溶液, 对照组加入等量的蒸馏水, 每种质 3 个重复, 每个重复 50 粒。种子处理方法同 1.2.1, 并测量相关指标:

发芽率=发芽的种子数/供试种子数×100%

发芽势=6 d 发芽的种子数/供试种子数×100%

发芽指数=Σ 每天发芽数/供试种子数

根冠比=根长/芽长

相对值=盐处理测定值/对照处理测定值

1.3 数据处理

采用 Excel 和 IBM SPSS 软件对所测数据进行

处理和分析。计算每项指标的隶属函数值和平均隶属函数值, 参考张会丽等^[22]的方法; 计算权重 (W_j) 和综合得分值 (Z_j), 参考刘丙花等^[23]和李艳辉等^[24]的方法, 如以下公式所示。利用系统聚类法, 将所有种质分类, 得到种质资源聚类图。

$$\text{正隶属函数值 } U_j = (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

$$\text{负隶属函数值 } U_j = 1 - (X_j - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (2)$$

$$\text{平均隶属函数值 } ASF = U_j / \sum_{i=1}^n U_j \quad (3)$$

$$\text{权重 } W_j = P_j / \sum_{j=1}^k P_j \quad (j=1, 2, \dots, k) \quad (4)$$

$$\text{综合得分值 } Z_j = \sum_{j=1}^k Z_j \times W_j \quad (j=1,2,\dots,k) \quad (5)$$

式中, j 表示第 j 份材料, X_j 表示第 j 份材料指标的测定值, 测量指标最大值 X_{\max} , 最小值是 X_{\min} 。正隶属函数, 所测指标与耐盐能力呈正比; 反之用负隶属函数; W_j 表示第 j 个综合指标在所有指标中的权重; P_j 表示经主成分分析所得到各材料第 j 个综合指标的方差贡献率, k 为提取的主成分个数; Z_j 表示第 j 个综合指标的得分值与权重乘积的和。

2 结果与分析

2.1 筛选耐盐种质的适宜盐浓度

为了确定蝴蝶豆萌芽期耐盐的适宜筛选浓度, 随机挑选 7 份蝴蝶豆种质在不同盐浓度下进行处理。由表 2、表 3, 图 1 可知, 当盐浓度为 0~100 mmol/L 时, 各组材料间的发芽势和发芽率

大多在 50%以上, 相比差异均不显著; 盐浓度为 200~250 mmol/L 时, 多组材料的发芽势均低于 40%, 发芽率均低于 30%, 且个别组的材料表现未发芽, 由此可见盐浓度越高对种子萌发影响力越大甚至导致其死亡; 但盐浓度在 150 mmol/L 时, 各组材料的发芽势、发芽率均值为 50%的约占 1/2, 这说明各种质在此浓度下表现差异显著, 可有效区分各种质的耐盐差异性。因此, 本研究借助发芽势、发芽率的显著差异性确定了蝴蝶豆耐盐种质的适宜筛选浓度为 150 mmol/L 的盐溶液。

2.2 盐胁迫下蝴蝶豆种子萌发的影响

在 150 mmol/L 盐胁迫下, 75 份蝴蝶豆种质发芽指标中相对根冠比变异系数最大, 为 67.75% (表 4)。这表明所测蝴蝶豆耐盐性相对根冠比变异比较丰富, 存在较大差异, 可以作为蝴蝶豆耐盐性评价指标。各种质的发芽率和发芽势集中在

表 2 不同盐浓度胁迫下 7 份材料的发芽势
Tab. 2 Germination vigor of seven materials under stress of different concentration of salt

种质 Germplasm	发芽势 Germination vigor/%					
	0 mmol·L ⁻¹	50 mmol·L ⁻¹	100 mmol·L ⁻¹	150 mmol·L ⁻¹	200 mmol·L ⁻¹	250 mmol·L ⁻¹
CIAT5175	70.00±0.163 ^b	46.67±0.047 ^b	46.67±0.094 ^b	33.33±0.047 ^{cd}	40.00±0.216 ^{cd}	26.67±0.047 ^a
CIAT5631	96.67±0.047 ^b	16.67±0.094 ^c	16.67±0.094 ^c	20.00±0.082 ^d	20.00±0.082 ^d	13.33±0.094 ^a
060221002	76.67±0.047 ^b	86.67±0.125 ^a	80.00±0.140 ^a	80.00±0.082 ^{ab}	66.67±0.047 ^{ab}	26.67±0.205 ^a
CIAT15160	80.00±0.082 ^{ab}	53.33±0.047 ^b	66.67±0.047 ^{ab}	66.67±0.094 ^b	46.67±0.094 ^{bc}	23.33±0.047 ^a
CIAT15470	83.33±0.047 ^{ab}	60.00±0.082 ^b	56.67±0.047 ^{ab}	66.67±0.125 ^b	26.67±0.094 ^{cd}	6.67±0.047 ^a
CIAT 草地	96.67±0.047 ^{ab}	53.33±0.189 ^b	43.33±0.094 ^b	40.00±0.082 ^c	36.67±0.047 ^{cd}	16.67±0.047 ^a
020301004	96.67±0.047 ^a	86.67±0.047 ^a	63.33±0.170 ^{ab}	86.67±0.047 ^a	80.00±0.082 ^a	20.00±0.082 ^a
均值	85.71	57.62	53.33	56.19	45.24	19.05

注: 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference between treatments ($P<0.05$).

表 3 不同盐浓度胁迫下 7 份材料的发芽率
Tab. 3 Germination rate of seven materials under stress of different concentration of salt

种质 Germplasm	发芽率 Germination rate/%					
	0 mmol·L ⁻¹	50 mmol·L ⁻¹	100 mmol·L ⁻¹	150 mmol·L ⁻¹	200 mmol·L ⁻¹	250 mmol·L ⁻¹
CIAT5175	66.67±0.205 ^d	46.67±0.047 ^c	43.33±0.125 ^b	33.33±0.047 ^{cdc}	26.67±0.170 ^{bc}	20.00±0.082 ^{ab}
CIAT5631	96.67±0.047 ^{ab}	13.33±0.125 ^d	16.67±0.094 ^c	16.67±0.125 ^{dc}	16.67±0.047 ^{bc}	13.33±0.094 ^{ab}
060221002	76.67±0.047 ^{cd}	83.33±0.170 ^{ab}	76.67±0.125 ^a	73.33±0.047 ^{ab}	66.67±0.047 ^a	23.33±0.170 ^a
CIAT15160	83.33±0.047 ^{abcd}	53.33±0.047 ^{bc}	60.00±0.082 ^{ab}	53.33±0.047 ^{bc}	33.33±0.047 ^b	10.00±0.082 ^{ab}
CIAT15470	80.00±0.082 ^{bcd}	53.33±0.094 ^{bc}	53.33±0.047 ^{ab}	56.67±0.188 ^{bc}	16.67±0.125 ^{bc}	0.00±0.000 ^b
CIAT 草地	96.67±0.047 ^{ab}	53.33±0.189 ^{bc}	43.33±0.094 ^b	40.00±0.082 ^{cd}	30.00±0.082 ^{bc}	16.67±0.047 ^{ab}
020301004	96.67±0.047 ^{ab}	86.67±0.047 ^a	63.33±0.094 ^{ab}	86.67±0.047 ^a	76.67±0.047 ^a	20.00±0.082 ^{ab}
均值	96.67	55.71	50.95	51.43	38.10	14.76

注: 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference between treatments ($P<0.05$).

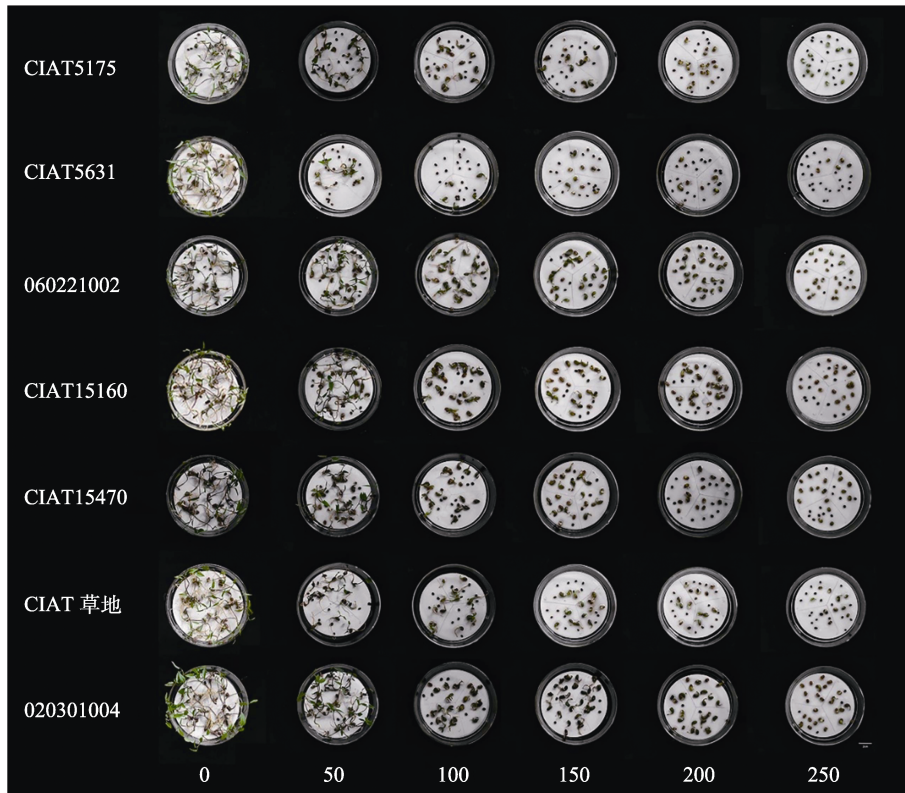


图 1 不同 NaCl 浓度处理种子发芽情况

Fig. 1 Seed germination with different NaCl concentrations

表 4 150 mmol/L 盐胁迫下各发芽指标的变异分析

Tab. 4 Variation analysis of germination indexes under 150 mmol/L salt stress

项目 Item	最小值 Min	最大值 Max	均值 Mean	标准差 Standard	变异系数 Coefficient of variation/%
发芽率/%	0.14	0.88	0.52	0.18	34.57
发芽势/%	0.16	0.90	0.53	0.18	33.40
相对发芽率	0.41	1.76	0.91	0.21	23.49
相对发芽势	0.41	1.76	0.91	0.21	23.49
发芽指数	3.83	37.17	19.78	8.37	42.31
相对发芽指数	0.32	1.55	0.79	0.21	26.96
根长/mm	4.67	26.00	13.40	5.04	37.58
相对根长	0.14	0.83	0.40	0.16	38.88
芽长/mm	4.33	16.67	10.76	3.23	29.97
相对芽长	0.10	1.34	0.32	0.15	46.69
根冠比	0.52	4.74	1.47	0.87	59.08
相对根冠比	0.44	5.64	1.62	1.10	67.75
鲜重/g	0.05	0.11	0.08	0.01	15.13
相对鲜重	0.46	0.90	0.65	0.08	12.99

50%左右，根长和芽长小于 15 mm 的种质分别占 30%和 50% (图 2)，说明盐胁迫对蝴蝶豆的发芽指标相对于根长、芽长来说影响较小，盐胁迫严重抑制了蝴蝶豆根和芽的生长发育。

2.3 盐胁迫下各指标的相关性分析

盐胁迫下，对各指标进行相关性分析 (表 5)

表明，蝴蝶豆与发芽率、发芽势相关的任意 2 个发芽指标之间均呈极显著正相关 ($P < 0.01$)，其中发芽率与发芽势的相关系数最大，为 0.992，发芽指数和相对发芽指数相关系数最小，为 0.344。而芽长和根冠比以及相对值之间呈极显著负相关 ($P < 0.01$)，且相关系数表示芽长与根冠比之间关

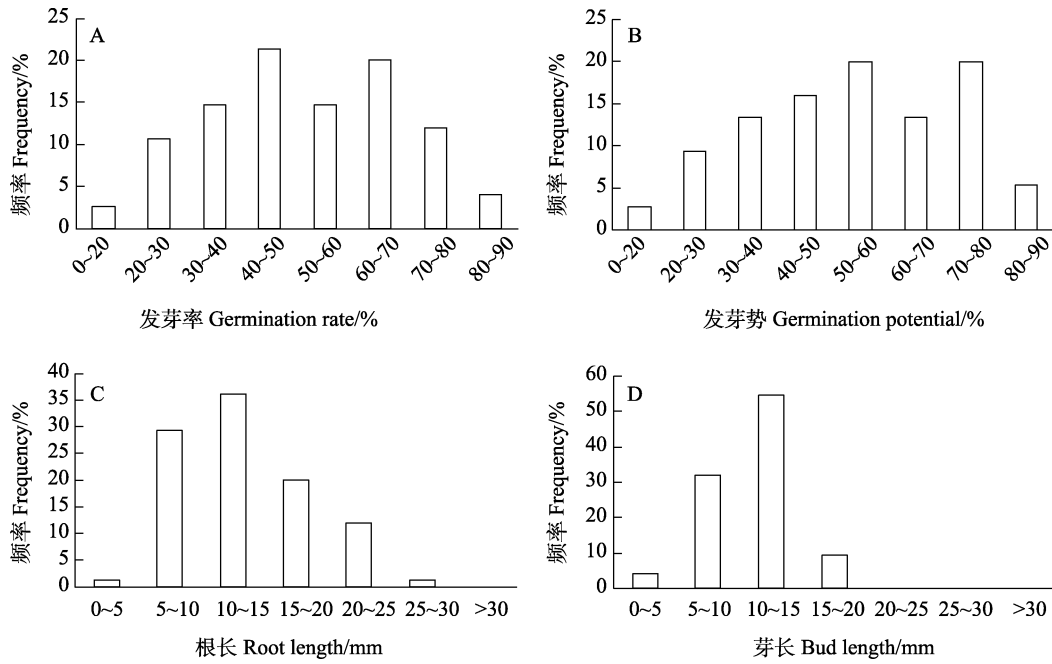


图 2 频率分布

Fig. 2 Frequency distribution chart

表 5 150 mmol/L 盐胁迫下各发芽指标的相关性分析

Tab. 5 Correlation analysis of germination indexes under 150 mmol/L salt stress

项目 Item	发芽率 Germination rate	发芽势 Germination potential	相对发芽率 Relative germination rate	相对发芽势 Relative germination rate	发芽指数 Germination index	相对发芽指数 Relative germination index	根长 Root length	相对根长 Relative root length	芽长 Bud length	相对芽长 Relative bud length	根冠比 Root shoot ratio	相对根冠比 Relative root shoot ratio	鲜重 Fresh weight	相对鲜重 Relative fresh weight
发芽率	1.000													
发芽势	0.992**	1.000												
相对发芽率	0.367**	0.352**	1.000											
相对发芽势	0.559**	0.546**	0.956**	1.000										
发芽指数	0.939**	0.935**	0.344**	0.519**	1.000									
相对发芽指数	0.366**	0.349**	0.913**	0.889**	0.443**	1.000								
根长	0.391**	0.387**	0.242*	0.306**	0.413**	0.202	1.000							
相对根长	0.335**	0.329**	0.164	0.247*	0.317**	0.094	0.868**	1.000						
芽长	0.325**	0.321**	0.106	0.191	0.391**	0.223	0.013	-0.191	1.000					
相对芽长	0.116	0.112	-0.069	-0.011	0.141	0.030	-0.081	-0.068	0.503**	1.000				
根冠比	0.052	0.051	0.104	0.088	0.033	0.009	0.661**	0.656**	-0.609	-0.408	1.000			
相对根冠比	0.175	0.169	0.123	0.134	0.147	0.030	0.676**	0.729**	-0.546	-0.456	0.931**	1.000		
鲜重	0.469**	0.463**	0.248*	0.319**	0.539**	0.324**	0.453**	0.242*	0.586**	0.325**	-0.039	0.031	1.000	
相对鲜重	0.321**	0.314**	0.022	0.131	0.341**	0.134	0.092	0.107	0.478**	0.417**	-0.277*	-0.200	0.515**	1.000

注：*表示显著相关 ($P<0.05$)，**表示极显著相关 ($P<0.01$)。

Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$), ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

系密切，系数最大，为-0.609，说明芽长越长根冠比、相对根冠比就越小，反之则越大。盐胁迫

下蝴蝶豆萌芽期各指标间均存在着不同程度的相关性，因此可选择主要指标来评价蝴蝶豆种质的

耐盐性。

2.4 主成分分析

在对蝴蝶豆所有发芽指标进行标准化后, 再进行主成分分析, 并根据每个成分的特征值和贡献率提取主成分(表 6)。其中有 4 个特征值大于 1 的成分, 因此将这 4 个成分作为主成分, 其特征值分别为 5.20、2.99、2.06、1.39, 方差贡献率为 37.12%、21.37%、14.72%和 9.95%。这 4 个主成分累积方差贡献率达 83.17%, 超过了 80%, 说明因子的提取效果很好, 涵盖了所有指标的大部分信息, 整体归纳性好、综合反应性强, 可将其作为蝴蝶豆耐盐种质评价筛选的综合指标。

由各主成分载荷矩阵(表 7)可知, 唯一对第一主成分产生负向影响的是根冠比且影响不大, 其数值为-0.026, 其余指标均对第一主成分产生正向影响。其中, 影响最大的是发芽指数、发芽率、发芽势、相对发芽势, 数值分别为 0.872、0.865、0.855、0.789, 说明发芽指数、发芽率、相对发芽指数及相对发芽势对第一主成分起主要正向影响作用。

对第二主成分产生正向影响的指标有发芽指

数、发芽率、发芽势、鲜重、相对芽长、芽长、相对鲜重、根冠比, 其余指标对第二主成分产生负向影响。其中, 相对芽长、芽长起主要正向影响较大, 数值分别为 0.786、0.709; 根长、相对根冠比、相对根长起主要负向影响, 数值分别为 -0.464、-0.835、-0.552; 发芽指数、发芽率、发芽势、相对发芽指数对第二主成分影响不大。

第三主成分负向指标: 相对发芽势、相对发芽指数、相对发芽率、芽长, 其载荷值分别为 -0.528、-0.613、-0.639、-0.018, 其余均为第三主成分正向指标。其中, 根长、相对根冠比、相对根长、根冠比对第三主成分起主要正向影响, 数值为 0.479、0.342、0.521、0.339; 而相对发芽势、相对发芽指数、相对发芽率起主要负向影响; 芽长对第三主成分影响可忽略不计。

第四主成分影响因素中鲜重、相对鲜重可忽略不计, 负向影响因素有发芽指数、发芽率、发芽势、芽长, 其余均为正向指标。其中, 相对发芽势、相对发芽率、相对芽长、根冠比对第三主成分起主要正向影响, 数值为 0.300、0.333、0.444、0.662; 而发芽指数、发芽率、发芽势、根长起主要负向影响。

表 6 各指标主成分的方差贡献率

Tab. 6 Variance contribution rate of principal components of each index

元件 Element	初始特征值 Initial eigenvalue			提取平方和载入 Extract sum of squares load		
	特征值 Characteristic value	方差贡献率 Variance contribution rate/%	累加 Accumulation/%	特征值 Characteristic value	方差贡献率 Variance contribution rate/%	累加 Accumulation/%
1	5.197	37.123	37.123	5.197	37.123	37.123
2	2.992	21.374	58.497	2.992	21.374	58.497
3	2.061	14.720	73.217	2.061	14.720	73.217
4	1.393	9.949	83.167	1.393	9.949	83.167
5	0.988	7.055	90.221			
6	0.558	3.985	94.206			
7	0.364	2.603	96.809			
8	0.157	1.118	97.927			
9	0.124	0.889	98.816			
10	0.113	0.808	99.624			
11	0.020	0.141	99.765			
12	0.016	0.115	99.880			
13	0.009	0.065	99.945			
14	0.008	0.055	100.000			

注: 提取方法采用主体元件分析。

Note: Extraction method using host component analysis.

表 7 蝴蝶豆耐盐指标的主成分载荷矩阵
Tab. 7 Principal component load matrix of salt tolerance index

指标 Index	元件 Element			
	1	2	3	4
发芽指数	0.872	0.086	0.125	-0.311
发芽率	0.865	0.042	0.122	-0.330
发芽势	0.855	0.043	0.130	-0.339
相对发芽势	0.789	-0.119	-0.528	0.219
相对发芽指数	0.678	-0.020	-0.613	0.300
鲜重	0.666	0.312	0.256	0.025
相对发芽率	0.656	-0.162	-0.639	0.333
根长	0.592	-0.464	0.479	0.239
相对根冠比	0.246	-0.835	0.342	0.139
相对芽长	0.158	0.786	0.288	0.444
芽长	0.408	0.709	-0.018	-0.206
相对根长	0.483	-0.552	0.521	0.251
相对鲜重	0.407	0.500	0.262	-0.076
根冠比	-0.026	0.504	0.339	0.662

注：提取方法采用主体元件分析。

Note: Extraction method using host component analysis.

2.5 蝴蝶豆耐盐性综合评价

对 75 份蝴蝶豆种质耐盐性进行综合评价，将综合得分值和平均隶属函数值（ASF）作为评价耐盐性强弱的标准，综合得分值和 ASF 值越大，表明其耐盐性就越强，反之则越弱。首先将蝴蝶豆发芽指标原始数据标准化后，借助公式（5）计算综合得分（ $Z=0.37Z_1+0.21Z_2+0.14Z_3+0.09Z_4$ ）进行排序（表 8）。综合得分值为-0.745~2.003，跨度范围大也表明各种质间耐盐性差异较大。排名前十的耐盐种质为：69 > 2 > 4 > 12 > 49 > 1 > 21 > 6 > 20 > 18，排名后十的敏盐种质为：57 < 55 < 63 < 45 < 52 < 54 < 65 < 30 < 70 < 73。这 2 种评价方法都表达了蝴蝶豆的耐盐差异性较大。

然后对平均隶属函数值进行排序（表 8），平均隶属函数值（不超过 1）范围在 0.14~0.61 之间，其值跨度范围大表明各种质间耐盐性差异较大。综合排名前十的种质为：59 > 67 > 12 > 20 > 2 > 4 > 1 > 69 > 75 > 49，综合排名后十的种质为：45 < 63 < 65 < 30 < 48 < 31 < 15 < 57 < 51 < 55。用这 2 种综

表 8 蝴蝶豆耐盐指标平均隶属函数和综合得分排名分析
Tab. 8 Ranking analysis of average membership function and comprehensive score of salt tolerance index

编号 No.	平均隶属 函数 Average	排名 Ranking	综合得分 Score	排名 Ranking	编号 No.	平均隶属 函数 Average	排名 Ranking	综合 得分 Score	排名 Ranking	编号 No.	平均隶属 函数 Average	排名 Ranking	综合 得分 Score	排名 Ranking
1	0.545	7	0.549	6	26	0.341	46	-0.216	52	51	0.232	67	-0.183	49
2	0.577	5	0.765	2	27	0.247	65	-0.297	59	52	0.249	64	-0.544	71
3	0.433	28	0.247	20	28	0.402	35	0.356	14	53	0.369	42	-0.021	38
4	0.552	6	0.642	3	29	0.390	37	0.165	22	54	0.306	56	-0.519	70
5	0.529	11	0.370	12	30	0.199	72	-0.474	68	55	0.245	66	-0.732	74
6	0.487	19	0.457	8	31	0.215	70	-0.208	51	56	0.454	23	0.020	34
7	0.388	38	0.336	15	32	0.352	44	-0.175	47	57	0.226	68	-0.745	75
8	0.348	45	0.010	36	33	0.316	54	-0.169	46	58	0.306	55	-0.322	61
9	0.431	29	0.050	31	34	0.494	17	0.284	18	59	0.609	1	0.149	24
10	0.390	36	0.162	23	35	0.322	50	-0.237	55	60	0.427	31	0.039	32
11	0.319	53	0.004	37	36	0.287	59	-0.184	50	61	0.430	30	-0.138	45
12	0.597	3	0.580	4	37	0.320	52	-0.274	57	62	0.340	47	-0.382	64
13	0.518	13	0.392	11	38	0.289	57	-0.321	60	63	0.140	74	-0.620	73
14	0.405	33	0.149	25	39	0.487	18	0.335	16	64	0.450	24	-0.027	39
15	0.224	69	-0.363	63	40	0.338	48	-0.291	58	65	0.160	73	-0.498	69
16	0.443	26	0.096	27	41	0.384	39	0.079	29	66	0.481	21	0.065	30
17	0.459	22	-0.110	43	42	0.436	27	-0.106	42	67	0.600	2	0.113	26
18	0.517	14	0.423	10	43	0.322	51	-0.133	44	68	0.283	60	-0.340	62
19	0.370	41	0.211	21	44	0.368	43	-0.216	53	69	0.542	8	2.003	1
20	0.592	4	0.428	9	45	0.139	75	-0.616	72	70	0.275	61	-0.463	67
21	0.516	15	0.499	7	46	0.425	32	0.325	17	71	0.372	40	0.021	33
22	0.266	62	0.011	35	47	0.402	34	0.248	19	72	0.445	25	-0.176	48
23	0.518	12	0.366	13	48	0.206	71	-0.413	65	73	0.288	58	-0.431	66
24	0.484	20	-0.066	40	49	0.534	10	0.578	5	74	0.496	16	-0.228	54
25	0.253	63	-0.268	56	50	0.333	49	-0.104	41	75	0.538	9	0.082	28

合评价方法来评价蝴蝶豆的耐盐性,表明不同评价方法对 75 份蝴蝶豆种质耐盐强弱的排名稍有不同,但大体差异不大,耐盐材料和敏盐材料的筛选结果基本一致。

2.6 聚类分析

综合得分值 (Z) 其包括信息全面,因此对蝴蝶豆耐盐综合得分值进行最远距离系统聚类分析,在欧式距离为 4 处可将 75 份蝴蝶豆种质分为四大类(图 3)。第 1 类为极耐盐种质,编号 69 单独分为一类;第 2 类为耐盐种质,包括编号 2、4、12、49、1、21、6、20、18、13、5、23、28、7、39、46、34 共 17 份;第 3 类为低耐盐种质,编号 52、65、54、63、45、57、55 共 7 份种质;第 4 类编号 29、10、59 等 50 份材料为敏盐种质。

3 讨论

我国土壤盐渍化形势日益严峻,目前,最为

经济、有效利用盐渍土的途径是种植耐盐植物对土壤进行生物改良^[25]。蝴蝶豆在国内外作为优质饲料^[26]和绿肥覆盖物^[10-11],其种质资源数量庞大、质量优异,遗传变异种类丰富多样,为开展蝴蝶豆种质资源的研究和创新提供重要材料基础。因此,系统性评价和利用耐盐性强的蝴蝶豆种质资源,对蝴蝶豆品种的选育具有重要的现实意义。本研究首先对 7 份蝴蝶豆种质萌芽期在 6 个不同盐浓度下的研究发现,150 mmol/L 盐溶液胁迫下,蝴蝶豆表现出较大的耐盐性差异,因此确定该浓度为最适宜筛选浓度,与张红梅等^[18]在豇豆耐盐性研究方面的结果一致。然后在 150 mmol/L 浓度下,综合评价 75 份蝴蝶豆属种质材料的耐盐性,研究表明,盐处理材料与对照相比,各种质的开始发芽时间普遍延迟了约 1 d,该现象与田蕾等^[27]对粳稻进行盐胁迫过程的表现一致,说明盐胁迫对植物芽期影响严重。

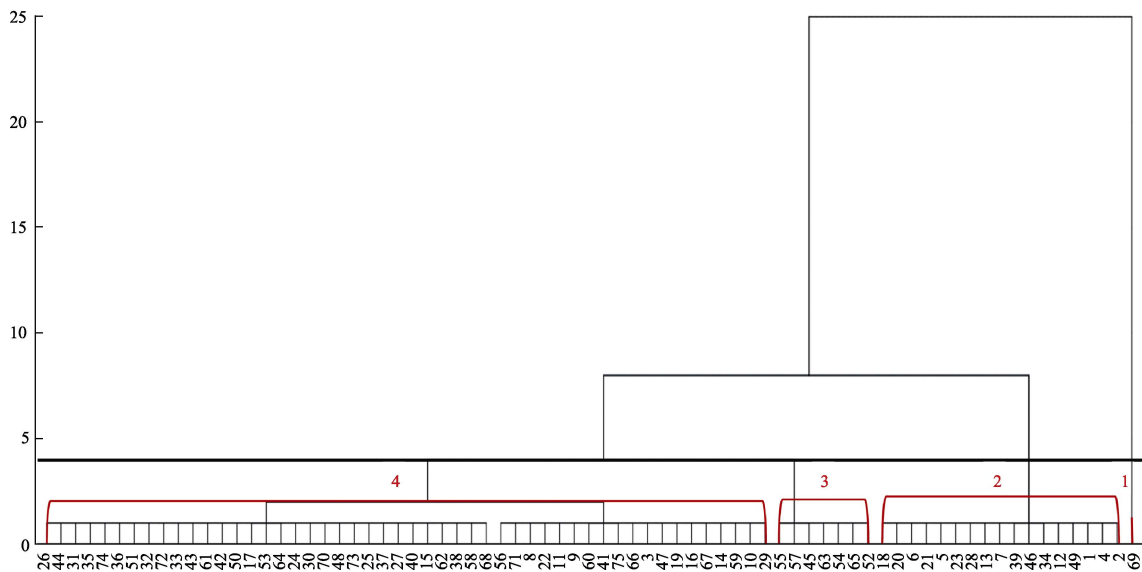


图 3 聚类分析

Fig. 3 Cluster analysis

变异系数变化值较大的性状指标更能反映出材料间的耐盐性差异^[28]。研究中,蝴蝶豆种质发芽指标中相对根冠比变异系数最大(67.75%),表明所测蝴蝶豆耐盐性相对根冠比变异比较丰富,存在较大差异,因此可作为蝴蝶豆耐盐性评价指标。通过相关性分析和主成分分析发现,发芽指数、相对根冠比、相对发芽率和根冠比这 4 个指标与主成分关系最为密切,完全囊括了变异分析的信息,且包括蝴蝶豆耐盐特性的大部分信息,

因此将这 4 个指标作为耐盐评价指标。田蕾等^[27]发现水稻芽期评价指标为发芽指数、相对根长和相对盐害率;孙璐等^[29]确定根长、鲜重和发芽率作为鉴定高粱耐盐性指标。由此可以看出,发芽指数、根长、发芽率差异变化较大,可作为耐盐评价指标。研究发现,蝴蝶豆种质的根长和芽长均在 25 mm 以下,且 15 mm 左右的占比最大,发芽率和发芽势普遍在 50%左右,由此可知,相对于种质发芽,胚根和胚芽的生长对 NaCl 胁迫更为

敏感, 这与罗小燕等^[30]对山蚂蝗的研究、杨林^[31]对豆科牧草的研究结果一致, 根长、芽长受盐胁迫影响最大。

相关性分析结果表明, 蝴蝶豆在盐胁迫下, 萌芽期各类指标间有不同程度的关联性, 这与前人研究结果一致^[32], 发芽率与发芽势相关任意 2 个指标间呈现极显著正相关 ($P < 0.01$), 胚芽长和相对根冠比、根冠比相互之间呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。本研究使用的各类指标对蝴蝶豆耐盐性综合评价贡献率不同, 因此, 要精确得出蝴蝶豆的耐盐性, 应有更多的指标进行研究, 再进行综合分析, 这样才能全面反映蝴蝶豆种质耐盐性强弱。

本研究对综合得分进行聚类分析, 将 75 份蝴蝶豆属种质分为四大类, 编号 69 为第 1 类极耐盐种质; 第 2 类为耐盐种质 (编号 2、4、12、49、1、21、6、20、18、13、5、23、28、7、39、46、34 共 17 份); 第 3 类为低耐盐种质 (编号 52、65、54、63、45、57、55 共 7 份种质); 第 4 类为敏盐种质 (编号 29、10、59 等 50 份)。编号 69 的蝴蝶豆种质通过平均隶属函数分析, 得出其数值 0.542, 排名第 8, 综合分析得分 2.003, 排名第 1, 2 种评价体系下综合表现优异, 最耐盐。但由于不同生长阶段, 植物的耐盐性有一定的差异, 所以萌芽期筛选出的耐盐种质能在苗期有何种表现需进一步验证。

4 结论

本研究通过不同盐浓度梯度筛选出最适浓度为 150 mmol/L, 在该浓度处理下测定 75 份蝴蝶豆种质萌芽期相关耐盐指标, 通过相关性分析、主成分分析、聚类分析对 75 份蝴蝶豆种质耐盐性进行综合评价, 确定蝴蝶豆耐盐评价指标是发芽指数、相对根冠比、相对发芽率和根冠比, 结果表明, 050321057 蝴蝶豆 (编号 69) 在参试种质材料中表现出极其耐盐性。为蝴蝶豆耐盐性研究和选育耐盐品种提供理论支撑。

参考文献

- [1] ZENG L, SHANNON M C, GRIEVE C M. Evaluation of salt tolerance in rice genotypes by multiple a geronomic parameters[J]. *Euphytica*, 2002, 127(2): 235-245.
- [2] YAMAGUCHI T, BLUMWALD E. Developing salt tolerant crop plants: challenges and opportunities[J]. *Trends in Plant Science*, 2005, 10(12): 615-620.
- [3] ASHRAF M Y, AWAN A R, MAHMOOD K. Rehabilitation of saline ecosystems through cultivation of salt tolerant plants[J]. *Pakistan Journal of Botany*, 2012, 44(44): 69-75.
- [4] AKBARI G, SANAVY S A, YOUSEFZADEH S. Effect of auxin and salt stress (NaCl) on seed germination of wheat cultivars (*Triticum aestivum* L.)[J]. *Science Alert*, 2007, 10(15): 2557-2561.
- [5] ASHRAF M, MCNEILLY T. Salinity tolerance in *Brassica* oil seeds[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2004, 23(2): 157-174.
- [6] 李彦, 张英鹏, 孙明, 高弼模. 盐分胁迫对植物的影响及植物耐盐机理研究进展[J]. *中国农学通报*, 2008, 24(1): 258-265.
- [7] LI Y, ZHANG Y P, SUN M, GAO B M. Research progress on the effects of salt stress on plants and the mechanism of plant salt tolerance[J]. *Bulletin of Chinese Agronomy*, 2008, 24(1): 258-265. (in Chinese)
- [7] 孟繁昊, 王聪, 徐寿军. 盐胁迫对植物的影响及植物耐盐机理研究进展[J]. *内蒙古民族大学学报(自然科学版)*, 2014, 29(3): 315-318.
- [7] MENG F H, WANG C, XU S J. Research progress on the effects of salt stress on plants and the mechanism of plant salt tolerance[J]. *Journal of Inner Mongolia Minzu University (Natural Sciences)*, 2014, 29(3): 315-318. (in Chinese)
- [8] 黄梅芬, 和占星, 奎嘉祥, 匡崇义. 湿热地区优良牧草距瓣豆[J]. *草业科学*, 2003, 20(5): 9-10.
- [8] HUANG M F, HE Z X, KUI J X, KUANG C Y. An excellent legumina (*Centrosema pubescens*) in humid subtropical areas[J]. *Pratacultural Science*, 2003, 20(5): 9-10. (in Chinese)
- [9] 杨春霞, 赵志平, 李春丽, 丁华平, 许丽月, 李永梅. 云南胶园耐荫豆科绿肥资源调查与评价[J]. *植物遗传资源学报*, 2010, 10(2): 45-49.
- [9] YANG C X, ZHAO Z P, LI C L, DING H P, XU L Y, LI Y M. Investigation and evaluation of shade-tolerance leguminous plant resources in Yunnan rubber plantation[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2010, 10(2): 45-49. (in Chinese)
- [10] 广东植物研究所引种驯化研究室优良绿肥—距瓣豆[J]. *植物志*, 1974(2): 21-22.
- [10] *Centrosema pubescens* Benth, an excellent green fertilizer in the introduced and domestication Laboratory of Guangdong Institute of Botany[J]. *Flora*, 1974(2): 21-22. (in Chinese)
- [11] 刘国道, 罗丽娟, 白昌军, 王东劲, 郑学勤. 海南豆科饲用植物资源及营养价值评价[J]. *草地学报*, 2006, 14(3): 254-260.
- [11] LIU G D, LUO L J, BAI C J, WANG D J, ZHENG X Q. A survey of Hainan island forage legume resources and assessment of their nutritional values[J]. *Acta Agrestia Sinica*,

- 2006, 14(3): 254-260. (in Chinese)
- [12] 杨春霞, 赵志平, 杨丽萍. 不同覆盖绿肥在云南开割胶园的生态适应性研究[J]. 热带作物学报, 2011, 32(11): 2180-2186.
YANG C X, ZHAO Z P, YANG L P. Ecological adaptability of different mulch green manure in Yunnan tapped rubber plantation[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2011, 32(11): 2180-2186. (in Chinese)
- [13] 赵志平, 杨丽萍, 杨春霞. 橡胶园覆盖绿肥综合开发利用价值研究[J]. 热带作物学报, 2012, 33(12): 2293-2299.
ZHAO Z P, YANG L P, YANG C X. Exploitation and utility value of different mulch green manure in tapped rubber plantation[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2012, 33(12): 2293-2299. (in Chinese)
- [14] 杨春霞, 赵志平, 杨丽萍, 黎小清. 不同覆盖绿肥养分特性及其对橡胶园土壤理化性质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 467-474.
YANG C X, ZHAO Z P, YANG L P, LI X Q. Nutrient characteristics of mulch green manure and their influences on soil physical and chemical property in Yunnan rubber plantation[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(2): 467-474. (in Chinese)
- [15] 钟声, 文际坤, 周自玮, 杨世平, 张为林, 朱学贵, 周一于, 王丽萍, 王文贤. 甘蔗套种豆科牧草研究[J]. 云南畜牧兽医, 2003(3): 7-8.
ZHONG S, WEN J K, ZHOU Z W, YANG S P, ZHANG W L, ZHU X G, ZHOU Y Y, WANG L P, WANG W X. Study on interplanting Leguminous forage with *Saccharum officinarum*[J]. Yunnan Journal of Animal Science and Veterinary Medicine, 2003(3): 7-8. (in Chinese)
- [16] 王婧, 刘璐, 刘骥华, 王慧慧, 谢宇涵, 柴琦. 草地早熟禾不同品种苗期耐盐性鉴定[J]. 中国农学通报, 2019, 35(18): 36-43.
WANG J, LIU L, LIU Q H, WANG H H, XIE Y H, CHAI Q. Salt tolerance identification of Kentucky bluegrass varieties at seedling stage[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(18): 36-43. (in Chinese)
- [17] 柴艳, 孙宗玖, 李培英, 巴德木其其格, 张向向, 杨静. 新疆狗牙根种质芽期耐盐性综合评价[J]. 草业学报, 2017, 26(8): 154-167.
CHAI Y, SUN Z J, LI P Y, BADEMU Q Q G, ZHANG X X, YANG J. Evaluation of the salt resistance of the *Cynodon dactylon* germplasm from Xinjiang during the seed germination period[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(8): 154-167. (in Chinese)
- [18] 张红梅, 许文静, 陈华涛, 陈景斌, 刘晓庆, 杨守萍, 陈新. 豇豆耐盐种质资源鉴定[J]. 华北农学报, 2021, 36(S1): 39-52.
ZHANG H M, XU W J, CHEN H T, CHEN J B, LIU X Q, YANG S P, CHEN X. Identification of salt tolerance of yardlong bean germplasm accessions[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2021, 36(S1): 39-52. (in Chinese)
- [19] 严琳玲, 张瑜, 王文强. 距瓣豆对盐胁迫的生理响应及综合评价[J]. 种子, 2019, 38(10): 6-13.
YAN L L, ZHANG Y, WANG W Q. Physiological response and comprehensive evaluation of *Centrosema pubescens* to salt stress[J]. Seed, 2019, 38(10): 6-13. (in Chinese)
- [20] 严琳玲, 张瑜, 白昌军. 蝴蝶豆属种质苗期抗旱性鉴定研究[J]. 广东农业科学, 2015, 42(24): 66-73.
YAN L L, ZHANG Y, BAI C J. Identification of drought resistance of *Centrosema pubescens* Benth at seedling stage[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2015, 42(24): 66-73. (in Chinese)
- [21] 张瑜, 严琳玲, 罗小燕, 白昌军. 高温胁迫下蝴蝶豆的生理响应和耐热性评价[J]. 种子, 2017, 36(11): 44-48.
ZHANG Y, YAN L L, LUO X Y, BAI C J. Physiological response and thermal evaluation of *C. pubescens* Benth under high temperature stress[J]. Seed, 2017, 36(11): 44-48. (in Chinese)
- [22] 张会丽, 袁闯, 朱林, 许兴. 利用隶属函数值法对玉米成熟期耐盐性的综合评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(2): 47-55.
ZHANG H L, YUAN C, ZHU L, XU X. Comprehensive evaluation of salt-tolerance of maize at mature period using subordinate function value analysis[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2018, 46(2): 47-55. (in Chinese)
- [23] 刘丙花, 王开芳, 王小芳, 梁静, 白瑞亮, 谢小锋, 孙蕾. 基于主成分分析的蓝莓果实质地品质评价[J]. 核农学报, 2019, 33(5): 927-935.
LIU B H, WANG K F, WANG X F, LIANG J, BAI R L, XIE X F, SUN L. Evaluation of fruit texture quality of blueberry based on principal component analysis[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(5): 927-935. (in Chinese)
- [24] 李艳辉, 崔雅芳, 牟宁宁, 崔滢心, 张雨辰, 郭金辉, 王宇辰. 4种观花地被耐践踏性主成分及隶属函数分析[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(2): 134-136.
LI Y H, CUI Y F, MOU N N, CUI Y X, ZHANG Y C, GUO J H, WANG C Y. Principal component and subordinate function analysis of trampling resistance of 4 flower plants of ground cover[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2022, 50(2): 134-136. (in Chinese)
- [25] 徐鹏程, 冷翔鹏, 刘更森, 宋长年, 房经贵. 盐碱土改良利用研究进展[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(5): 293-298.
XU P C, LENG X P, LIU G S, SONG C N, FANG J G. Re-

- search progress on improvement and utilization of saline alkali soil[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2014, 42(5): 293-298. (in Chinese)
- [26] CHINGALA G, MTIMUNI J P, MSISKA H, GONDWE T, CHIGWA F C. Milk production performance of Friesian-Holstein cows fed diets containing *Medicago sativa*, *Centrosema pubescens*, or groundnut haulms (*Arachis hypogaea*)[J]. Tropical Animal Health and Production, 2013, 45(7): 1485-1488.
- [27] 田蕾, 陈亚萍, 刘俊, 马晓刚, 王娜, 杨兵, 李莹, 郭海东, 李娟, 胡慧, 张银霞, 李培富. 粳稻种质资源芽期耐盐性综合评价与筛选[J]. 中国水稻科学, 2017, 31(6): 631-642.
- TIAN L, CHEN Y P, LIU J, MA X G, WANG N, YANG B, LI Y, GUO D H, LI J, HU H, ZHANG Y X, LI P F. Comprehensive evaluation and selection of rice (*Oryza sativa japonica*) germplasm for saline tolerance at germination stage[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2017, 31(6): 631-642. (in Chinese)
- [28] 武建新. 66份白三叶萌发期耐旱性、耐盐性、耐酸铝性评价[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2017.
- WU J X. Assessment on drought tolerance, salt tolerance and acid-aluminum tolerance of 66 white clovers in the germination stage[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [29] 孙璐, 周宇飞, 汪澈, 肖木辑, 陶冶, 许文娟, 黄瑞冬. 高粱品种萌发期耐盐性筛选与鉴定[J]. 中国农业科学, 2012, 45(9): 1714-1722.
- SUN L, ZHOU Y F, WANG C, XIAO M J, TAO Y, XU W J, HUANG R D. Screening and identification of sorghum cultivars for salinity tolerance during germination[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(9): 1714-1722. (in Chinese)
- [30] 罗小燕, 李欣勇, 张瑜, 王文强, 丁西朋. 8种山蚂蝗种子萌发期耐盐耐旱性差异分析[J]. 草地学报, 2020, 28(5): 1329-1336.
- LUO X Y, LI X Y, ZHANG Y, WANG W Q, DING X P. Difference analysis of salt and drought tolerance of eight *Desmodium* species seeds during germination[J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(5): 1329-1336. (in Chinese)
- [31] 杨林. NaCl胁迫对5种豆科牧草种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 种子, 2013, 32(12): 79-80.
- YANG L. Effect of salt stress on seed germination and seedling growth of 5 Leguminous forages[J]. Seed, 2013, 32(12): 79-80. (in Chinese)
- [32] 李萍, 燕佳琦, 张鹤, 张燕, 陶顺仙, 张琪, Aldiyar, 徐爱遐, 黄镇. 146份甘蓝型油菜种质芽期耐盐性筛选及评价[J]. 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, ALDIYAR, XU A X, HUANG Z. Screening and evaluation of salt tolerance for 146 *Brassica napus* germplasms at germination stage[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2021, 30(6): 848-859. (in Chinese)