



离子型稀土矿废弃地剑豆耐性种质筛选

朱婷, 马玲, 冯灏怡, 邓楠, 刘心亮, 刘明骞

引用本文:

朱婷, 马玲, 冯灏怡, 邓楠, 刘心亮, 刘明骞. 离子型稀土矿废弃地剑豆耐性种质筛选[J]. 热带亚热带植物学报, 2024, 32(4): 465–474.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4796>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

三角梅*cDOPA 5GT*基因的克隆和光照对其表达的影响

Cloning of Cyclo-DOPA-5-glucosyltransferase Gene from *Bougainvillea glabra* and Effect of Illumination on Its Expression
热带亚热带植物学报. 2021, 29(1): 75–81 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4233>

木豆种质资源形态与农艺性状的多样性分析

Diversity Analysis of Morphological and Agronomic Traits in *Cajanus cajan*
热带亚热带植物学报. 2017, 25(1): 51–56 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3633>

黑木相思优良无性系叶片数量性状与生长评价

Leaf Quantitative Traits and Growth Evaluation in *Acacia melanoxylon* Excellent Clones
热带亚热带植物学报. 2017, 25(5): 465–471 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3731>

基于表型性状和SSR标记的57份辣椒种质遗传多样性分析

Genetic Diversity Analysis of 57 Germplasms of *Capsicum annuum* Based on Phenotypic Traits and SSR Markers
热带亚热带植物学报. 2020, 28(4): 356–366 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4185>

基于RAD-SNPs分析的四川核桃良种资源的遗传多样性研究

Studies on Genetic Diversity of *Juglans* Cultivar Germplasms in Sichuan Based on RAD-SNPs Analysis
热带亚热带植物学报. 2019, 27(1): 19–28 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3906>

向下翻页, 浏览PDF全文

离子型稀土矿废弃地剑豆耐性种质筛选

朱婷^a, 马玲^a, 冯灏怡^a, 邓楠^a, 刘心亮^a, 刘明骞^{a,b}

(华南农业大学, a. 林学与风景园林学院, b. 文博馆(档案馆、华南农业博物馆), 广州 510642)

摘要: 为筛选离子型稀土矿废弃地耐性强的剑豆种质材料, 20 个剑豆(*Canavalia ensiformis*)种质资源进行盆栽试验, 并观测生长性状指标, 采用方差分析、隶属函数分析和聚类分析等方法对剑豆种质的生长性状进行综合评价。结果表明, 在苗期和始花期, 不同剑豆种质的株高、地径、主茎粗、主茎节数和地上生物量均存在显著差异($P<0.05$)。20 个种质隶属函数综合评价值为: PI 279593>PI 362193>NT 576>BN-13474-63>PI 470242>PI 358592>B2>PI 181048>PI 364355>CHN3>PI 470931>PI 337078>CHN4>PI 164695>PI 276655>CPI 50103>B1>PI 338584>PI 404610>PI 308540。聚类分析结果表明, 20 个种质可分为 5 大类, 其中第 IV 类的生长性状最好, 第 V 类次之, 这与隶属函数结果一致。经复筛, 在离子型稀土采矿土壤上生长性状好的前 5 个种质的综合评价值为: PI 362193>NT 576>PI 279593>BN-13474-63>PI 470242。PI 362193 是耐性最强的种质, 可作为离子型稀土采矿迹地生态修复最优的剑豆种质, NT 576、PI 27959 可作为备选种质。

关键词: 剑豆; 种质筛选; 生长性状; 隶属函数法

doi: 10.11926/jtsb.4796

Screening of Tolerance Germplasm for *Canavalia ensiformis* in the Abandoned Area of Ionic Rare Earth Mine

ZHU Ting^a, MA Ling^a, FENG Haoyi^a, DENG Lan^a, LIU Xinliang^a, LIU Mingqian^{a,b}

(a. College of Forestry and Landscape Architecture, b. Archives & South China Agricultural Museum, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: In order to select the germplasm resources with strong tolerance in the abandoned land of ionic rare earth mine, twenty *Canavalia ensiformis* germplasms derived from more than 10 countries or regions were potted, the growth traits were observed and evaluated by variance analysis, membership function analysis and cluster analysis, variance analysis, membership function analysis and cluster analysis. The results showed that there were significant differences in plant height, ground diameter, stem thick, main stalk pitch number and aboveground biomass among different germplasms at seedling stage and initial flowering stage ($P<0.05$). The membership function analysis showed that comprehensive evaluation value of 20 germplasms were in the order of PI 279593>PI 362193>NT 576>BN-13474-63>PI 470242>PI 358592>B2>PI 181048>PI 364355>CHN3>PI 470931>PI 337078>CHN4>PI 164695>PI 276655>CPI 50103>B1>PI 338584>PI 404610>PI 308540. The cluster analysis showed that 20 germplasms could be divided into 5 categories, among which the fourth category had the best growth characteristics, followed by the fifth category, which was consistent with the result of membership function. The secondary screening experiment showed that the comprehensive evaluation value of the top five germplasms with good growth characteristics on ionic rare earth mine soil were in the order of PI 362193>NT 576>PI 279593>BN-13474-63>PI 470242. Therefore, PI 362193 had the strongest tolerance, which could be used

收稿日期: 2023-04-14 接受日期: 2023-08-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(31901226)资助

The work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 31901226).

作者简介: 朱婷(1998 年生), 女, 硕士, 研究方向为森林生态学。E-mail: 2242730693@qq.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liumq0123@163.com

as the best choice for ecological restoration of ionic rare earth mine, while NT 576 and PI 27959 can be used as candidate germplasms.

Key words: *Canavalia ensiformis*; Germplasm screening; Growth trait; Membership function method

离子型稀土矿早期多采用浸提工艺提取稀土,造成了植被破坏、水土流失和土壤污染等一系列严重的环境问题,已成为当地可持续发展的制约因素,生态修复迫在眉睫^[1-4]。植物修复是废弃矿山修复中成本最低、效果最好的修复方法^[5],在矿山修复过程中,植物可以通过根系分泌物和枯枝落叶残体来改善土壤结构、提高土壤养分,促进微生物群落结构发展,从而促进矿山生态系统的快速修复^[6-7]。由于采矿迹地土壤极其贫瘠,碳、氮、磷等营养元素含量极低,植物生存和群落自然演替都受到限制,因此需要选择合适的先锋植物^[8-9]。目前应用于矿山修复的植物主要有十字花科(Brassicaceae)^[10]、菊科(Compositae)^[11]、禾本科(Poaceae)^[12]和豆科(Leguminosae)^[13]等。豆科植物被认为是修复采矿迹地最适宜的植物物种,主要是因为它可以形成根瘤,减少了对土壤中氮素的依赖,或在较短时间内显著提高土壤养分^[14],能够有效的改良土壤理化性质、增加土壤有机质、提高土壤肥力,尤其适用于贫瘠矿土的修复。

剑豆(*Canavalia ensiformis*)是豆科刀豆属的一种直立或攀爬的草本植物,因豆荚形似刀剑,故得名剑豆,又称洋刀豆、海刀豆。剑豆有着悠久的栽培历史,广泛分布于全球热带与亚热带地区,在我国主要分布于长江以南地区^[15]。剑豆中富含蛋白质、不饱和脂肪酸、必需氨基酸、维生素和矿物质等营养物质,被认为是发展中国家潜在的食物和饲料来源之一^[16-17],其所含的刀豆蛋白 A 是目前研究最多的植物凝集素,具有抗癌的作用,被广泛应用于医药保健领域^[18-19]。此外,剑豆因根系发达,适应性强,耐盐、耐旱、耐贫瘠,常被用于绿肥、间作和轮作植物^[20-21],甚至被视为先锋植物,用于矿山土壤的改良和生态修复^[22-23]。现有的研究主要集中在剑豆种子中的营养成分^[24-26]、凝集素的提取及应用^[27-28]以及对污染土壤的生态恢复中^[29-30],对剑豆种质评价的研究较少。而剑豆的分布广泛,长期的自然选择使得不同地区各种质间的抗逆能力存在着较大差异,因此,在使用剑豆作为先锋植物进行离子型稀土矿生态修复时,选出抗逆性强的种质非常必要,可以更好的提高稀土矿的生态修复效

果。基于此,本研究选用典型的离子型稀土矿废弃地土壤作为基质,对来源于 10 余个国家或地区的 20 个剑豆种质的生长性状进行测定,研究不同剑豆种质间生长性状的差异,并采用隶属函数法对其进行综合评价,筛选出适用于离子型稀土矿地的剑豆种质,为离子型稀土矿迹地的生态修复提供一定的理论依据和材料基础。

1 材料和方法

1.1 材料

本试验于华南农业大学教学科研基地(23°09'50" N, 113°21'60" E)中开展,该地区属于亚热带季风气候,年平均气温为 20℃~22℃,年均降雨量为 1 689.3~1 876.5 mm^[31]。选取位于广东省梅州市平远县仁居镇黄畲村(24°48'33.21" N, 115°49'56.75" E)的一处废弃离子型稀土矿迹地土壤作为试验土壤,极度贫瘠,质地疏松,以砂土为主。土壤养分状况为: pH 4.82,全氮含量 0.022 g/kg,碱解氮含量 27.363 mg/kg,全磷含量 0.039 g/kg,速效磷含量 0.434 mg/kg,全钾含量 37.059 g/kg,速效钾含量 52.813 mg/kg,有机质含量 6.896 g/kg,铜 9.899 mg/kg,锌 77.923 mg/kg,镉 0.233 mg/kg,铅 86.439 mg/kg,锰 328.591 mg/kg。土壤重金属轻微污染,但营养元素含量较低,为植物自然演替主要限制因素。

植物材料为从澳大利亚热带作物和饲料研究中心(Australian Tropical Crops and Forages Collection, AusTRCF)和美国农业部国家植物种质中心(National Plant Germplasm System, NPGS)引进的以及从中国、巴西采集的共 20 个剑豆种质(表 1)。

1.2 实验设计

初筛试验 盆栽试验,20 个剑豆种质,随机区组设计,3 个区组,6 株重复。于 2022 年 4 月上旬播种,并在 5 月上旬(苗期)和 6 月下旬(始花期)分别进行株高、地径、主茎粗、主茎节数、地上生物量等生长指标测定。初步筛选出 5 个耐性能力强的品种。

复筛试验 将初筛的 5 个种质在 2022 年 9 月上旬进行复筛试验,11 月下旬(始花期)测量株高、

表1 剑豆种质材料

Table 1 Germplasm of *Canavalia ensiformis* used in this study

| 种质 Germplasm | 来源 Source | 原产地 Origin | 种质 Germplasm | 来源 Source | 原产地 Origin |
|-----------------|--------------|---------------|-----------------|--------------|---------------|
| NT 576 | AusTRCF | N/A | PI 181048 | NPGS | 印度 |
| CPI 50103 | AusTRCF | 委内瑞拉 | PI 276655 | NPGS | N/A |
| PI 358592 | AusTRCF | 埃塞俄比亚 | PI 308540 | NPGS | 哥伦比亚 |
| BN-13474-63 | AusTRCF | 苏丹 | PI 337078 | NPGS | 巴西 |
| PI 470242 | AusTRCF | 印度尼西亚 | PI 338584 | NPGS | 哥斯达黎加 |
| PI 279593 | AusTRCF | 菲律宾 | PI 362193 | NPGS | 萨尔瓦多 |
| B1 | Collected | 巴西 | PI 364355 | NPGS | 萨尔瓦多 |
| B2 | Collected | 巴西 | PI 470931 | NPGS | 秘鲁 |
| CHN3 | Collected | 中国海南 | PI 164695 | NPGS | 印度 |
| CHN4 | Collected | 中国广西 | PI 404610 | NPGS | 印度尼西亚 |

N/A: 尚不明确。

N/A: Not clear.

地径、主茎粗、主茎节数、根长、根面积、地上生物量和根部生物量等生长性状。随机区组设计, 3个区组, 6株重复。

1.3 数据采集方法

株高是指植株出土位置到植株茎顶端生长点的高度, 使用量尺进行测量; 主茎粗是指植株中部的茎粗, 地径是指子叶痕下部 1 cm 处的粗度, 均使用游标卡尺进行测量; 自子叶痕处算起, 向上的节间数为主茎节数(也称为叶轮数), 使用目测法计量。地上生物量是将剑豆植株自离土 1 cm 处的地上部剪下, 将各个区组的每个种质(各 3 株)装入一个信封并做好标识, 放入 105 °C 烘箱中杀青 30 min 后, 再在 65 °C 下烘至恒重。根部性状的测定: 剑豆根部先用清水冲洗, 将完整的根系放入自封袋, 并立即带回实验室, 使用 WinRHIZO 根系分析系统测得根长、根面积和根体积等, 然后装入信封, 杀青后烘至恒重, 得到根系的生物量。

1.4 数据分析

使用 Excel 表格对数据进行整理、SPSS 26.0 软件对数据进行分析, 使用 Adobe Illustrator CC 22.1 软件做图。采用单因素方差分析各种质生长性状间的差异性, 并使用 LSD 和 Duncan 多重比较法进行显著性分析, 以 $P < 0.05$ 表示差异显著。采用系统聚类分析方法对剑豆生长指标进行分析, 并使用隶属函数法^[32]对生长指标进行综合评价。隶属函数公式为: $U_{ij} = (X_{ij} - X_{jmin}) / (X_{jmax} - X_{jmin})$, 综合指数 = $(U_{ij} + U_{ik} + \dots + U_{im}) / n$, 其中 X_{ij} 为第 i 品种第 j 个指标的测定值。

2 结果和分析

2.1 生长性状分析

由表 2 和表 3 可知, 20 个种质间同一生长期的生长性状均存在不同程度的差异。在苗期, 不同种质的株高为 9.72~17.31 cm, 其中 PI 279593 显著高于其他种质($P < 0.05$), 其次为 B2、PI 470242、CHN3、BN-13474-63 和 NT 576, 分别高于群体平均值的 41.45%、14.24%、12.77%、10.64%、9.99% 和 6.56%。株高最小的种质为 CPI 50103, 株高最大与最小的种质间相差 78.09%。地径为 3.28~4.19 mm, 平均为 3.68 mm, 最大的种质为 PI 362193 (4.19 mm), 其次是 PI 470931 (4.07 mm) 和 PI 470242 (3.94 mm), 均高于群体平均值; 最小的是 PI 404610 (3.28 mm), 其中 PI 362193 的地径显著大于除 PI 470931 和 PI 470242 外的其他种质($P < 0.05$)。不同种质主茎粗为 3.09~4.19 mm, 平均为 3.57 mm, 其中 PI 362193 最大, 为 4.19 mm, PI 364355、PI 276655 和 PI 181048 次之, 均大于 3.80 mm, 而 PI 279593 最小, 仅为 3.09 mm。多重比较表明, PI 362193 与 PI 364355、PI 276655 的主茎粗差异不显著, 但与其他种质存在显著差异($P < 0.05$)。主茎节数最小的为 PI 276655 和 PI 308540 (均为 2.15 节/株), 最高的是 PI 279593 (达 3.7 节/株), 两者相差 1.72 倍, 群体平均值为 2.60 节/株, 其中高于群体平均值的有 PI 279593、PI 470242、CPI 50103、NT 576、BN-13474-63 和 CHN3, 分别超过群体平均值的 42.31%、7.70%、1.92%、13.46%、9.62% 和 13.46%。地上生物量为 1.10~3.52 g, 不同种

质间差异不显著,只有 PI 279593 显著大于 PI 470931、PI 308540 和 PI 338584 ($P<0.05$), 其他种质间无显著差异。

在始花期, 种质 PI 279593、CHN4、PI 358592、PI 470242、NT 576 和 BN-13474-63 的株高分别高于群体平均值的 60.42%、36.29%、28.75%、23.54%、19.36%和 18.48%, 其中株高最大的为 PI 279593 (47.20 cm), 最小的为 PI 308540 (20.20 cm), 且 PI 279593 的株高显著高于其他种质($P<0.05$)(表 3)。就地径和主茎粗而言, 各种质间虽存在差异, 但相比

株高的差异不大。地径为 3.46~4.60 mm, 群体平均值为 3.88 mm; 主茎粗为 2.43~3.67 mm, PI 362193 的地径和主茎粗均最大, 而地径最小的为 BN-13474-63, 主茎粗最小的则是 CHN3。相比于苗期, 此时剑豆的主茎节数以及地上生物量有了很大的增长, 主茎平均节数由 2.60 节/株增长至 6.98 节/株, 平均地上生物量也由 1.99 g 增长至 5.84 g, 主茎节数和地上生物量最大的种质均为 PI 279593 (分别为 9.3 节/株和 9.73 g)、最小的均为 PI 308540 (分别为 5.5 节/株和 3.36 g), 两者差异显著($P<0.05$)。

表 2 剑豆种质苗期的生长指标的比较

Table 2 Comparison of growth indexes of *Canavalia ensiformis* germplasms at seedling stage

| 种质 Germplasm | 株高 (cm) Height | 地径 (mm) Ground diameter | 主茎粗 (mm) Stem thick | 主茎节数 (节/株) Main stalk pitch number | 地上生物量 (g) Aboveground biomass |
|-----------------|-------------------|----------------------------|------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| PI 279593 | 17.31±3.46a | 3.74±0.32cdef | 3.09±0.51g | 3.70±0.57a | 2.42±0.82ab |
| PI 358592 | 12.69±2.69bcdef | 3.68±0.34cdefg | 3.40±0.56cdefg | 2.50±0.61cde | 3.52±2.70a |
| PI 470242 | 13.80±2.81bc | 3.94±0.36abc | 3.69±0.46bcd | 2.80±0.52bc | 1.84±1.29ab |
| CPI 50103 | 9.72±2.08h | 3.61±0.34defgh | 3.24±0.35efg | 2.65±0.49bcd | 2.24±1.64ab |
| NT 576 | 13.04±2.00bcde | 3.81±0.34bcd | 3.72±0.49bcd | 2.95±0.51b | 1.75±0.69ab |
| B1 | 11.78±2.66cdefg | 3.49±0.24efghi | 3.62±0.53bcde | 2.55±0.76bcde | 1.91±0.88ab |
| B2 | 13.98±3.84b | 3.76±0.62cde | 3.70±0.59bcd | 2.60±0.75bcd | 1.93±1.20ab |
| BN-13474-63 | 13.46±3.01bcd | 3.65±0.34defgh | 3.45±0.63bcdefg | 2.85±0.75bc | 2.95±0.48ab |
| CHN4 | 12.85±4.04bcde | 3.36±0.49hi | 3.33±0.46defg | 2.55±0.51bcde | 2.57±1.20ab |
| CHN3 | 13.54±3.00bcd | 3.65±0.39cdefgh | 3.41±0.50cdefg | 2.95±0.39b | 1.77±0.44ab |
| PI 181048 | 12.19±2.25bcdefg | 3.85±0.30bcd | 3.80±0.50bc | 2.50±0.61cde | 1.55±0.76ab |
| PI 404610 | 10.55±3.32gh | 3.28±0.44i | 3.21±0.79fg | 2.45±0.51cde | 1.38±0.71ab |
| PI 470931 | 11.48±3.53defgh | 4.07±0.30ab | 3.65±0.64bcde | 2.55±0.60bcde | 1.26±0.33b |
| PI 164695 | 11.20±2.30efgh | 3.45±0.31fghi | 3.50±0.36bcdef | 2.45±0.60cde | 1.92±1.49ab |
| PI 276655 | 11.07±2.76efgh | 3.75±0.55bcde | 3.85±0.53ab | 2.15±0.49e | 1.47±0.68ab |
| PI 308540 | 10.30±2.30gh | 3.61±0.52defgh | 3.62±0.63bcde | 2.15±0.49e | 1.11±0.39b |
| PI 337078 | 11.82±2.38cdefg | 3.43±0.32ghi | 3.64±0.36bcde | 2.55±0.60bcde | 2.59±1.36ab |
| PI 338584 | 10.73±2.32fgh | 3.40±0.42ghi | 3.40±0.44cdefg | 2.35±0.59de | 1.10±0.17b |
| PI 362193 | 11.15±2.29efgh | 4.19±0.47a | 4.19±0.79a | 2.35±0.49de | 2.45±0.92ab |
| PI 364355 | 12.09±1.76bcdefg | 3.83±0.29bcd | 3.85±0.52ab | 2.45±0.51cde | 2.14±0.18ab |
| 平均 Mean | 12.24 | 3.68 | 3.57 | 2.60 | 1.99 |

同列数据后不同字母表示差异显著($P<0.05$)。下同

Data followed different letters within column indicate significant differences at 0.05 level. The same below

2.2 隶属函数分析

不同种质的株高、地径、主茎粗、主茎节数和地上生物量在不同生长时期均存在显著差异, 为了更合理的筛选出耐性较强的剑豆种质, 避免只考虑单一性状的局限, 采用隶属函数值对各生长性状指标进行综合评价, 结果表明(表 4)。不同种质的隶属值为 0.353~0.594, 隶属值为: PI 279593>PI 362193>NT 576>BN-13474-63>PI 470242>PI 358592>B2>PI 181048>PI 364355>CHN3>PI 470931>PI 337078>

CHN4>PI 164695>PI 276655>CPI 50103>B1>PI 338584>PI 404610>PI 308540。因此, 综合评价最好的种质为 PI 279593, 其次是 PI 362193、NT 576、BN-13474-63 和 PI 470242, 综合评价值较低的种质有 CPI 50103、B1、PI 338584、PI 404610、PI 308540, 其中最小的是 PI 308540。由各指标的平均隶属函数值可以看出, 各种质在各生长性状间表现不同, 以综合评价最好的 PI 279593 和 PI 362193 为例, PI 279593 相较于 PI 362193 在株高和主茎节

表3 剑豆种质始花期生长指标的比较

Table 3 Comparison of growth indexes of *Canavalia ensiformis* germplasms at initial flowering stage

| 种质 Germplasm | 株高 (cm) Height | 地径 (mm) Ground diameter | 主茎粗 (mm) Stem thick | 主茎节数 (节/株) Main stalk pitch number | 地上生物量 (g) Aboveground biomass |
|-----------------|-------------------|----------------------------|------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| PI 279593 | 47.20±9.65a | 4.14±0.52ab | 2.99±0.25ab | 9.30±0.82a | 9.73±1.07a |
| PI 358592 | 37.88±16.62abc | 4.18±0.31ab | 2.86±0.65b | 7.80±0.92abc | 6.87±0.98bcd |
| PI 470242 | 36.35±11.73abcd | 4.10±0.36ab | 2.86±0.38b | 8.00±1.25ab | 7.39±1.03abc |
| CPI 50103 | 22.41±8.28de | 3.85±0.42ab | 3.01±0.37ab | 6.90±0.74bcd | 4.85±0.87cde |
| NT 576 | 35.12±8.88abcd | 4.16±0.20ab | 2.99±0.54ab | 7.40±1.35bcd | 7.51±0.63ab |
| B1 | 22.84±10.23de | 3.46±1.24b | 2.79±1.09b | 6.00±2.40cd | 3.92±0.42e |
| B2 | 28.81±11.02bcde | 4.19±0.32ab | 3.65±0.55a | 6.80±1.14bcd | 5.79±1.51bcde |
| BN-13474-63 | 34.86±11.06abcd | 4.03±0.49ab | 3.11±0.48ab | 7.50±1.65bc | 7.39±0.79abc |
| CHN4 | 40.10±28.47ab | 3.84±0.39ab | 2.59±0.56b | 7.10±1.66bcd | 4.95±1.04bcde |
| CHN3 | 31.59±16.42bcde | 3.56±1.32b | 2.43±0.93b | 6.90±2.69bcd | 5.71±1.07bcde |
| PI 181048 | 29.75±11.64bcde | 3.85±0.43ab | 2.90±0.69b | 7.20±1.40bcd | 5.71±0.31bcde |
| PI 404610 | 23.67±11.31de | 3.62±0.41b | 2.86±0.43b | 6.10±1.29bcd | 4.41±2.12de |
| PI 470931 | 26.03±20.58cde | 4.01±1.44ab | 2.66±1.07b | 6.40±2.88bcd | 5.48±2.63bcde |
| PI 164695 | 28.18±7.94bcde | 3.77±0.27b | 2.85±0.50b | 7.50±0.97bc | 5.26±0.84bcde |
| PI 276655 | 22.93±11.32de | 3.62±1.36b | 3.00±1.29ab | 6.30±2.36bcd | 5.61±1.84bcde |
| PI 308540 | 20.20±10.44e | 3.59±0.44b | 2.74±0.64b | 5.50±2.72d | 3.36±1.47e |
| PI 337078 | 23.80±5.42de | 3.74±0.35b | 2.97±0.79ab | 6.50±1.18bcd | 5.56±0.51bcde |
| PI 338584 | 24.66±7.85cde | 3.55±0.66b | 2.68±0.41b | 7.30±0.95bcd | 4.26±1.81de |
| PI 362193 | 22.99±8.06de | 4.60±0.24a | 3.67±0.58a | 6.00±1.05cd | 7.09±1.82bc |
| PI 364355 | 29.08±13.82bcde | 3.63±1.32b | 2.63±1.06b | 7.10±2.88bcd | 5.89±0.90bcde |
| 平均 Mean | 29.42 | 3.88 | 2.91 | 6.98 | 5.84 |

表4 剑豆种质生长性状的综合评价

Table 4 Comprehensive assessment on growth traits of *Canavalia ensiformis* germplasms

| 种质 Germplasm | 隶属函数值 Membership function value | | | | | 综合评价值 Comprehensive valuation | 排序 Ranking |
|-----------------|---------------------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------------|------------------------------|----------------------------------|---------------|
| | 株高 Height | 地径 Ground diameter | 主茎粗 Stem diameter | 主茎节数 Main stalk pitch number | 地上生物量 Aboveground biomass | | |
| PI 181048 | 0.367 | 0.620 | 0.509 | 0.526 | 0.244 | 0.453 | 8 |
| PI 276655 | 0.310 | 0.575 | 0.529 | 0.415 | 0.240 | 0.414 | 15 |
| PI 308540 | 0.278 | 0.545 | 0.459 | 0.385 | 0.099 | 0.353 | 20 |
| PI 337078 | 0.335 | 0.522 | 0.488 | 0.511 | 0.325 | 0.436 | 12 |
| PI 338584 | 0.306 | 0.497 | 0.412 | 0.496 | 0.150 | 0.372 | 18 |
| PI 362193 | 0.313 | 0.766 | 0.661 | 0.448 | 0.391 | 0.516 | 2 |
| PI 364355 | 0.362 | 0.593 | 0.489 | 0.511 | 0.306 | 0.452 | 9 |
| PI 404610 | 0.297 | 0.480 | 0.396 | 0.474 | 0.167 | 0.363 | 19 |
| PI 470931 | 0.333 | 0.682 | 0.455 | 0.507 | 0.216 | 0.439 | 11 |
| PI 164695 | 0.333 | 0.531 | 0.449 | 0.526 | 0.254 | 0.418 | 14 |
| B1 | 0.331 | 0.507 | 0.465 | 0.493 | 0.194 | 0.398 | 17 |
| B2 | 0.416 | 0.637 | 0.570 | 0.533 | 0.274 | 0.486 | 7 |
| BN-13474-63 | 0.423 | 0.597 | 0.467 | 0.615 | 0.432 | 0.507 | 4 |
| CHN3 | 0.414 | 0.550 | 0.388 | 0.615 | 0.264 | 0.446 | 10 |
| PI 279593 | 0.580 | 0.627 | 0.389 | 0.870 | 0.504 | 0.594 | 1 |
| PI 358592 | 0.411 | 0.619 | 0.432 | 0.548 | 0.455 | 0.493 | 6 |
| PI 470242 | 0.438 | 0.646 | 0.492 | 0.578 | 0.342 | 0.499 | 5 |
| CPI 50103 | 0.269 | 0.572 | 0.418 | 0.548 | 0.258 | 0.413 | 16 |
| NT 576 | 0.411 | 0.645 | 0.504 | 0.633 | 0.343 | 0.507 | 3 |

数上更占优势, 而 PI 362193 则在地径和主茎粗方面表现更好。

2.3 聚类分析

对 20 个种质生长指标进行聚类分析(图 1), 当欧式距离约为 13 时, 20 个种质可以分为 5 个类群。第 I 类群有 7 份材料, 包含 PI 337078、CPI 50103、CHN4、PI 164695、B1、PI 404610 和 PI 338584, 占全部种质的 35%; 第 II 类群有 3 份材料, 分别是 BN-13474-63、PI 358592 和 B2, 占 15%; 第 III 类群

最大, 有 8 份材料, 包含 PI 276655、PI 308540、PI 470242、NT 576、PI 181048、PI 364355、PI 470931 和 CHN3, 占 40%; 第 IV 类群和第 V 类群均只有 1 份材料, 分别为 PI 279593 和 PI 362193, 均占 5%。由表 5 可知, 不同类群种质间生长性状的差异显著 ($P<0.05$), 且剑豆生长指标平均值和平均隶属函数值最大的类群均为第 IV 大类(即 PI 279593), 其在株高、主茎节数和生物量方面具有显著优势, 其次是第 V 类群(PI 362193), 这与隶属函数分析的结果一致。

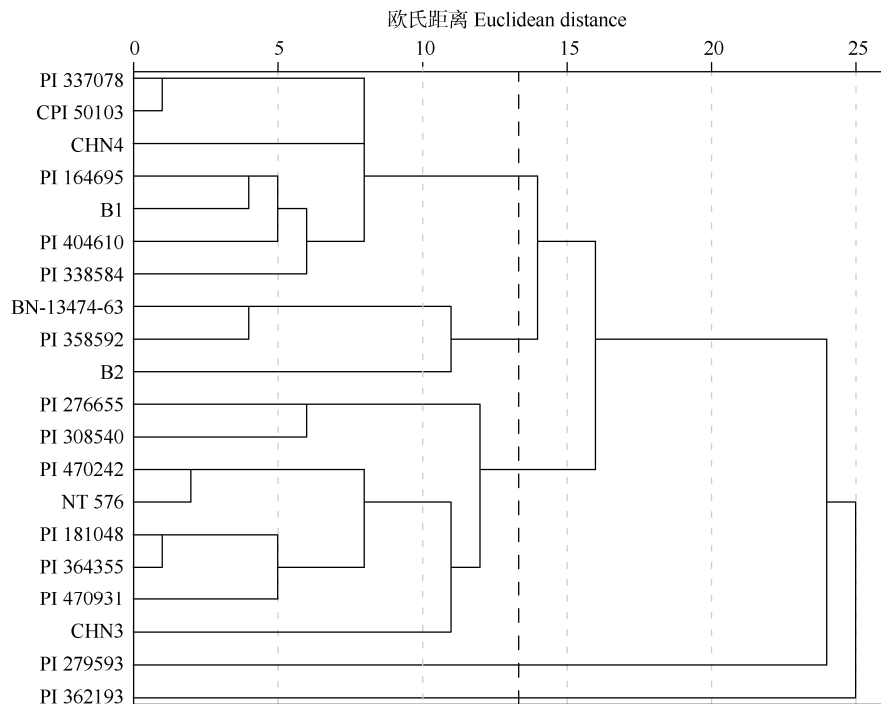


图 1 不同剑豆种质生长性状的聚类分析

Fig. 1 Cluster analysis of growth characters of *Canavalia ensiformis* from different germplasm

表 5 不同类群剑豆种质的生长情况

Table 5 Growth of different *Canavalia ensiformis* clusters

| 类别 Cluster | 株高 Plant height | 地径 Ground diameter | 主茎粗 Stem diameter | 主茎节数 Main stalk pitch number | 地上生物量 Aboveground biomass | 平均隶属值 Average membership value | 排序 Ranking |
|---------------|-----------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|---------------|
| I | 16.33±11.12bc | 3.52±0.48c | 3.22±0.62bc | 3.93±2.23b | 3.61±2.10b | 0.40±0.07c | 5 |
| II | 20.20±12.59b | 3.84±0.47b | 3.41±0.63b | 4.22±2.43b | 5.05±2.67ab | 0.50±0.05b | 3 |
| III | 17.75±11.50bc | 3.81±0.65b | 3.39±0.79b | 3.99±2.47b | 4.07±2.97b | 0.43±0.09c | 4 |
| IV | 26.85±15.66a | 3.87±0.44b | 3.07±0.44c | 5.45±2.73a | 6.68±5.10a | 0.59±0.05a | 1 |
| V | 15.09±7.47c | 4.33±0.45a | 4.01±0.76a | 3.57±1.89b | 5.28±3.88ab | 0.51±0.04b | 2 |

2.4 耐贫瘠种质的复筛

由于各种质间生长性状的变异系数较大, 为减小误差, 将初筛选出的 5 个优良种质(PI 279593、PI 362193、NT 576、BN-13474-63、PI 470242)再进

行复筛试验, 并比较更多表型性状, 以期得到更为准确的结果。由表 6 可知, 不同种质间除根平均直径外的其他生长性状均存在显著差异 ($P<0.05$), 其中除株高和主茎节数以外的其他生长性状指标中

数值最大的均为 PI 362193, 且 PI 362193 株高与最高的种质间无显著差异。各种质的平均隶属函数值

(表 7)为 PI 362193>NT 576>PI 279593>BN-13474-63>PI 470242。

表 6 5 个优良剑豆种质的植株生长情况

Table 6 Plant growth status of five excellent *Canavalia ensiformis* germplasms

| 性状 Trait | 种质 Germplasm | | | | |
|---|---------------------|------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| | PI 279593 | PI 470242 | NT 576 | BN-13474-63 | PI 362193 |
| 株高 Height (cm) | 21.37±7.67ab | 22.74±5.81ab | 23.16±7.76ab | 24.66±5.55a | 20.92±5.24ab |
| 地径 Ground diameter (mm) | 3.96±0.35b | 3.85±0.28b | 3.84±0.26b | 3.85±0.36b | 4.79±0.45a |
| 主茎粗 Stem diameter (mm) | 3.82±0.30b | 3.69±0.49b | 3.85±0.32ab | 3.59±0.55b | 4.12±0.44a |
| 主茎节数 Main stalk pitch number | 6.39±1.33ab | 6.89±1.37a | 6.61±1.50ab | 6.83±1.10a | 5.89±0.58b |
| 地上生物量 Aboveground biomass (g) | 4.18±2.15ab | 2.58±0.40c | 3.66±0.81bc | 3.47±0.93bc | 5.12±0.92a |
| 根生物量 Root biomass (g) | 1.10±0.36b | 0.99±0.12b | 1.17±0.23ab | 1.03±0.37b | 1.39±0.32a |
| 总根长 Total root length (cm) | 2 753.67±1 056.97ab | 2 481.69±292.11b | 2 905.19±575.23ab | 2 685.14±830.85ab | 3 219.27±792.75a |
| 根投影面积 Root projection area (cm ²) | 151.24±54.46ab | 132.68±16.88b | 155.46±32.87ab | 141.46±45.67ab | 175.06±43.74a |
| 根表面积 Root surface area (cm ²) | 475.13±171.10ab | 416.83±53.04b | 488.39±103.27ab | 444.41±143.47ab | 549.96±137.42a |
| 根平均直径 Mean root diameter (mm) | 0.55±0.04 | 0.53±0.03 | 0.53±0.02 | 0.53±0.03 | 0.54±0.01 |
| 根体积 Root volume (cm ³) | 6.56±2.32ab | 5.59±0.91b | 6.54±1.51ab | 5.87±2.04b | 7.48±1.92a |

表 7 5 个优良剑豆种质的生长性状综合评价

Table 7 Comprehensive assessment on growth characteristics of *Canavalia ensiformis* from five excellent germplasms

| 性状 Trait | 隶属函数值 Membership function value | | | | |
|------------------------------|---------------------------------|-----------|--------|-----------|-----------|
| | BN-13474-63 | PI 362193 | NT 576 | PI 470242 | PI 279593 |
| 株高 Height | 0.383 | 0.272 | 0.326 | 0.316 | 0.283 |
| 地径 Ground diameter | 0.301 | 0.589 | 0.242 | 0.247 | 0.286 |
| 主茎粗 Stem diameter | 0.523 | 0.633 | 0.547 | 0.497 | 0.538 |
| 主茎节数 Main stalk pitch number | 0.519 | 0.315 | 0.435 | 0.482 | 0.398 |
| 地上生物量 Aboveground biomass | 0.262 | 0.477 | 0.286 | 0.146 | 0.355 |
| 根生物量 Root biomass | 0.359 | 0.588 | 0.449 | 0.337 | 0.406 |
| 总根长 Total root length | 0.414 | 0.548 | 0.469 | 0.363 | 0.431 |
| 根投影面积 Root projection area | 0.442 | 0.608 | 0.511 | 0.398 | 0.490 |
| 根表面积 Root surface area | 0.442 | 0.608 | 0.511 | 0.398 | 0.490 |
| 根平均直径 Mean root diameter | 0.472 | 0.550 | 0.507 | 0.509 | 0.596 |
| 根体积 Root volume | 0.424 | 0.602 | 0.498 | 0.393 | 0.500 |
| 平均 Average | 0.413 | 0.526 | 0.435 | 0.372 | 0.434 |
| 排序 Ranking | 4 | 1 | 2 | 5 | 3 |

3 讨论和结论

早期研究中剑豆多作为先锋植物应用于矿土或者污染土壤修复, 重点集中在添加其他物质来帮助剑豆改善土壤环境、吸收重金属^[33], 以及多种先锋植物对矿山修复效果的比较^[22], 极少研究剑豆种质的筛选, 因此为了提高离子型稀土废弃矿中剑豆的整体修复效果, 进行种源筛选必不可少。株高、地径、主茎粗、生物量、根长、根面积等是最常见的植株生长性状评价指标, 这些指标在耐旱、耐寒、耐盐性等耐性种源筛选方面都有一定的应用, 可以更为直观的体现出各种源的耐性差异。谢芳等^[34]

通过测量株高、茎粗、地上重等指标筛选出耐旱性最强的亚麻(*Linum usitatissimum*)种质; 何海鹏等^[35]调查红豆草(*Onobrychis viciaefolia*)株高、地上和地下生物量等指标筛选出耐寒性最强的红豆草种质; 韩岱等^[36]对 60 个大豆(*Glycine max*)种质进行株高、地径、主茎节数等指标测定, 筛选出大豆耐盐性品种。

除农艺性状外, 不同生长期对各种质耐性筛选也存在显著影响。作物在不同生长期对干旱胁迫的敏感程度和表现存在差异, 且对花期的影响要大于苗期^[37-38]。不同生育期大豆的抗旱和抗盐碱表现不同^[39-40], 因此要综合考虑不同生育期间各种质的生

长发育情况。本研究结果表明, 剑豆不同生长期各种质间耐性也存在显著差异, 且始花期的差异较苗期更明显, 这与叶红云等^[32]的研究结果相似。其原因可能是苗期剑豆生长发育主要依靠子叶中的营养物质^[41-42], 部分性状差异不显著, 所以苗期的生长性状指标不适于筛选耐性强的剑豆种质。而在剑豆始花期, 各种质间的生长差异更明显, 可能与该时期植株生长所需的营养物质主要从土壤中获取有关^[43], 耐性强的种质则更能适应矿土环境, 因此, 在始花期筛选出的剑豆种质更加具有参考意义。

隶属函数和聚类分析是常用于植物抗逆性评价的分析方法, 目前在苜蓿(*Medicago sativa*)^[44]、玉米(*Zea mays*)^[45]和大豆^[36]等作物抗逆能力评价上广泛应用。根据初筛中隶属函数和聚类分析结果, 种质 PI 279593 和 PI 362193 的综合表现最好, 其次是种质 NT 576, 而早期课题组对剑豆部分种质的农艺性状分析时也认为种质 PI 279593 适用于土壤改良和林地覆盖^[31], 但当时未对种质 PI 362193 进行研究。此外, 在初筛中剑豆各种质间生长性状的变异系数较大, 因此, 为进一步提高筛选的准确性, 有必要增加一些生长指标进行复筛。在复筛实验中种质 PI 362193 的生长性状变异系数最小, 且大部分生长指标值均显著大于 PI 279593 和 NT 576, 综合评价也最高。因此综合考虑种质 PI 362193 是离子型稀土采矿迹地植物修复最优的剑豆种质, 可用于后期稀土矿的生态修复, 种质 NT 576 和 PI 279593 可作为备选种质。

本研究可为南岭地区离子型稀土采矿迹地的生态修复提供一定的理论支持, 为后续矿山生态重构提供科学依据。但本文只从植株的表型进行了研究, 并未对各种质间存在差异的原因进行分析, 后期我们可以进一步从分子层面研究各种质耐性存在差异的原因, 从而快速高效选育综合性状优异的剑豆种质资源。

参考文献

- [1] CHEN M, ZHANG D C, ZHU Q J, et al. Ionic rare earth mine of abandoned land of ecological restoration of research progress [J]. J Chin Soc Rare Earths, 2017, 35(4): 461-468. [陈敏, 张大超, 朱清江, 等. 离子型稀土矿山废弃地生态修复研究进展 [J]. 中国稀土学报, 2017, 35(4): 461-468. doi: 10.11785/S1000-4343.20170404.]
- [2] ZHOU L Y, LI Z L, LIU W, et al. Restoration of rare earth mine areas: Organic amendments and phytoremediation [J]. Environ Sci Pollut Res, 2015, 22(21): 17151-17160. doi: 10.1007/s11356-015-4875-y.
- [3] ZHENG X K, FENG X J, CHEN Z, et al. Research progress on environmental problems of ionic rare earth mining and restoration of abandoned land [J]. Appl Chem Ind, 2019, 48(3): 681-684. [郑先坤, 冯秀娟, 陈哲, 等. 离子型稀土矿开采环境问题及废弃地修复治理研究进展 [J]. 应用化工, 2019, 48(3): 681-684. doi: 10.16581/j.cnki.issn1671-3206.2019.03.015.]
- [4] CHAO Y Q, LIU W S, CHEN Y M, et al. Structure, variation, and co-occurrence of soil microbial communities in abandoned sites of a rare earth elements mine [J]. Environ Sci Technol, 2016, 50(21): 11481-11490. doi: 10.1021/acs.est.6b02284.
- [5] ALSABBAGH A H, ABUQUDaira T M. Phytoremediation of Jordanian uranium-rich soil using sunflower [J]. Water Air Soil Pollut, 2017, 228(6): 219. doi: 10.1007/s11270-017-3396-3.
- [6] CHEEKE T E, PHILLIPS R P, BRZOSTEK E R, et al. Dominant mycorrhizal association of trees alters carbon and nutrient cycling by selecting for microbial groups with distinct enzyme function [J]. New Phytol, 2017, 214(1): 432-442. doi: 10.1111/nph.14343.
- [7] CHAPON A, GUILLERM A Y, DELALANDE L, et al. Dominant colonisation of wheat roots by *Pseudomonas fluorescens* Pf29A and selection of the indigenous microflora in the presence of the take-all fungus [J]. Eur J Plant Pathol, 2002, 108(5): 449-459. doi: 10.1023/A:1016099707119.
- [8] LIU W S, LIU C, WANG Z W, et al. Limiting factors for restoration of dumping sites of ionic rare earth mine tailings [J]. Acta Pedol Sin, 2015, 52(4): 879-887. [刘文深, 刘畅, 王志威, 等. 离子型稀土矿尾砂地植被恢复障碍因子研究 [J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 879-887. doi: 10.11766/trxb201407310385.]
- [9] LIU L T, WANG X D, WEN Q, et al. Interspecific associations of plant populations in rare earth mining wasteland in southern China [J]. Int Biodet Biodegrad, 2017, 118: 82-88. doi: 10.1016/j.ibiod.2017.01.011.
- [10] WANG S L, ZHENG J G. Cd-accumulation characteristics of Brassica cultivars and their potential for phytoremediating Cd-contaminated soils [J]. J Fujian Agric For Univ (Nat Sci), 2004, 33(1): 94-99. [王松良, 郑金贵. 芸苔属蔬菜的 Cd 富集特性及其修复土壤 Cd 污染的潜力 [J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2004, 33(1): 94-99. doi: 10.3969/j.issn.1671-5470.2004.01.023.]
- [11] ZHANG Z G, YAO D X, ZHENG Y H, et al. The phytoremediation potential of six Compositae plants to soil pollution of heavy metal in coal mine collapse and reclaimed area [J]. J China Coal Soc, 2010, 35(10): 1742-1747. [张治国, 姚多喜, 郑永红, 等. 煤矿塌陷复垦区 6 种菊科植物土壤重金属污染修复潜力研究 [J]. 煤炭学报, 2010, 35(10): 1742-1747. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2010.10.032.]

- [12] BAI D Z, JI Z H, YANG Y X, et al. Study on three compounds cropping models on restoration of degradation red soil quality [J]. *J Soil Water Conserv*, 2005, 19(1): 160–163. [拜得珍, 纪中华, 杨艳鲜, 等. 3种复合种植模式对退化红壤质量恢复的初探 [J]. *水土保持学报*, 2005, 19(1): 160–163. doi: 10.3321/j.issn:1009-2242.2005.01.040.]
- [13] HEI Z W, XIANG H M, ZHANG J E, et al. Advances in legumes-based remediation of heavy metals contaminated soil [J]. *Ecol Sci*, 2019, 38(3): 218–224. [黑泽文, 向慧敏, 章家恩, 等. 豆科植物修复土壤重金属污染研究进展 [J]. *生态科学*, 2019, 38(3): 218–224. doi: 10.14108/j.cnki.1008-8873.2019.03.027.]
- [14] HUANG X R, ZHANG C W, ZHANG X X. The role of rhizobium in remediation of contaminated soils [J]. *Soil Fert Sci China*, 2016(5): 5–10. [黄兴如, 张彩文, 张晓霞. 根瘤菌在污染土壤修复中的地位和作用 [J]. *中国土壤与肥料*, 2016(5): 5–10. doi: 10.11838/sfsc.20160502.]
- [15] SMARTT J. Evolution of grain legumes. II. Old and new world pulses of lesser economic importance [J]. *Exp Agric*, 1985, 21(1): 1–18. doi: 10.1017/S0014479700012205.
- [16] SASIPRIYA G, SIDDHURAJU P. Evaluation of growth performance, serum biochemistry and haematological parameters on broiler birds fed with raw and processed samples of *Entada scandens*, *Canavalia gladiata* and *Canavalia ensiformis* seed meal as an alternative protein source [J]. *Trop Anim Health Prod*, 2013, 45(3): 811–820. doi: 10.1007/s11250-012-0293-z.
- [17] LIU M Q, CHEN L J, ZHOU W, et al. Study and comprehensive evaluation on the diversity of agronomic characters of *Canavalia ensiformis* [J]. *Chin J Trop Crops*, 2021, 42(2): 349–355. [刘明骞, 陈丽君, 周玮, 等. 剑豆主要农艺性状多样性研究与综合评价 [J]. *热带作物学报*, 2021, 42(2): 349–355. doi: 10.3969/j.issn.1000-2561.2021.02.008.]
- [18] NISHIZAWA K, ARII Y. Structural transitions of sword bean canavalin in response to different salt concentrations [J]. *Heliyon*, 2019, 5(12): e03037. doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e03037.
- [19] NISHIZAWA K, ARII Y. Reversible changes of canavalin solubility controlled by divalent cation concentration in crude sword bean extract [J]. *Biosci Biotechnol Biochem*, 2016, 80(12): 2459–2466. doi: 10.1080/09168451.2016.1224642.
- [20] CARLO-ACOSTA S I. Promoting the use of tropical legumes as cover crops in Puerto Rico [D]. Puerto Rico: University of Puerto Rico, 2009.
- [21] FEIDAS H, KOUAM M K, KANTZOURA V, et al. Global geographic distribution of *Trichinella* species and genotypes [J]. *Infect Genet Evol*, 2014, 26: 255–266. doi: 10.1016/j.meegid.2014.06.009.
- [22] MA L, RAO X Q, LU P, et al. Acid-tolerant plant species screened for rehabilitating acid mine drainage sites [J]. *J Soils Sediments*, 2015, 15(5): 1104–1112. doi: 10.1007/s11368-015-1128-0.
- [23] LIU M Q, DING M M, CHEN L J, et al. Genetic diversity and relationships among *Canavalia ensiformis* (L.) DC. Accessions as revealed by sequence-related amplified polymorphism markers [J]. *Biochem Syst Ecol*, 2014, 57: 242–249. doi: 10.1016/j.bse.2014.08.005.
- [24] ORIOLA K O, HUSSEIN J B, OKE M O, et al. Description and evaluation of physical and moisture-dependent thermal properties of jack bean seeds (*Canavalia ensiformis*) [J]. *J Food Process Preserv*, 2021, 45(2): e15166. doi: 10.1111/JFPP.15166.
- [25] SARIJAN, ADRIANUS, EKOWATI N Y, et al. Phytotoxicity test of probiotic bacteria in jack bean seed (*Canavalia ensiformis* L.) through seed viability test [J]. *J Phys Conf Ser*, 2021, 1899: 012018. doi: 10.1088/1742-6596/1899/1/012018.
- [26] MAHARDHIKA B P, RIDLA M, MUTIA R, et al. The evaluation of protease enzyme effectiveness in broiler chicken diet containing jack bean seed (*Canavalia ensiformis*) with different protein level toward internal organ size [J]. *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci*, 2021, 883(1): 012012. doi: 10.1088/1755-1315/883/1/012012.
- [27] FONSECA V J A, BRAGA A L, DE ALMEIDA R S, et al. Lectins ConA and ConM extracted from *Canavalia ensiformis* (L.) DC and *Canavalia rosea* (Sw.) DC inhibit planktonic *Candida albicans* and *Candida tropicalis* [J]. *Arch Microbiol*, 2022, 204(6): 346. doi: 10.1007/S00203-022-02959-X.
- [28] SANTOS V F, ARAÚJO A C J, FREITAS P R, et al. Enhanced antibacterial activity of the gentamicin against multidrug-resistant strains when complexed with *Canavalia ensiformis* lectin [J]. *Microb Pathog*, 2021, 152: 104639. doi: 10.1016/J.MICPATH.2020.104639.
- [29] SANTANA N A, RABUSCKE C M, SOARES V B, et al. Vermicompost dose and mycorrhization determine the efficiency of copper phytoremediation by *Canavalia ensiformis* [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2018, 25(13): 12663–12677. doi: 10.1007/s11356-018-1533-1.
- [30] NAM I H, ROH S B, PARK M J, et al. Immobilization of heavy metal contaminated mine wastes using *Canavalia ensiformis* extract [J]. *CATENA*, 2016, 136: 53–58. doi: 10.1016/j.catena.2015.07.019.
- [31] LIU M Q, CHEN X Y, CHEN L J, et al. Growth rhythm and main agronomic characters' genetic variation of 12 provenances of *Canavalia ensiformis* from Australia [J]. *Guangdong Agric Sci*, 2013, 40(23): 16–20. [刘明骞, 陈晓阳, 陈丽君, 等. 澳大利亚 12 个剑豆种源生长节律及主要农艺性状的遗传变异分析 [J]. *广东农业科学*, 2013, 40(23): 16–20. doi: 10.3969/j.issn.1004-874X.2013.23.005.]
- [32] YE H Y, LIU C L, HE C M, et al. Growth characteristics of *Astragalus sinicus* L. varieties [J]. *Fujian J Agric Sci*, 2022, 37(2): 258–266. [叶红

- 云, 刘彩玲, 何春梅, 等. 20 个紫云英品种不同生育期的生长性状分析与评价[J]. 福建农业学报, 2022, 37(2): 258–266. doi: 10.19303/j.issn.1008-0384.2022.002.016.]
- [33] PENG W X, YANG Y T, FENG J Y, et al. Improvement of sewage sludge and enhanced measure on soil of rare earth mine wasteland [J]. J S China Agric Univ, 2020, 41(5): 65–72. [彭维新, 杨源通, 冯嘉仪, 等. 污泥及强化措施对稀土矿区废弃地土壤的改良 [J]. 华南农业大学学报, 2020, 41(5): 65–72. doi: 10.7671/j.issn.1001-411X.202001007.]
- [34] XIE F, GUO D L, GE Y, et al. Evaluation and screening of flax germplasm for drought tolerance in the entire growth period [J]. J Xinjiang Univ (Nat Sci), 2023, 40(4): 467–475. [谢芳, 郭栋良, 葛优, 等. 亚麻全生育期耐旱性评价及耐旱种质筛选 [J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2023, 40(4): 467–475. doi: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2022.09.07.0001.]
- [35] HE H P, NAN L L, MA B, et al. Screening and evaluation of seedling stage cold tolerance in different sainfoin varieties [J]. Chin J Grassl, 2023, 45(5): 41–49. [何海鹏, 南丽丽, 马彪, 等. 红豆草种质苗期耐寒性筛选及评价 [J]. 中国草地学报, 2023, 45(5): 41–49. doi: 10.16742/j.zgdx.20220213.]
- [36] HAN D, SHI X L, DING S L, et al. Evaluation of salt tolerance in 60 soybean germplasm resources at seedling stage [J]. Soybean Sci, 2023, 42(4): 494–505. [韩岱, 时晓磊, 丁孙磊, 等. 60 份大豆种质资源苗期耐盐性鉴定评价 [J]. 大豆科学, 2023, 42(4): 494–505.]
- [37] GONG J. Effects of drought stress and re-watering on yield and growth and development of flax [D]. Chongqing: Southwest University, 2016. [龚静. 干旱胁迫和复水对亚麻生长发育及其产量的影响 [D]. 重庆: 西南大学, 2016.]
- [38] DONG F H. Effects of drought stress and rehydration on the growth and development of different varieties of *Fagopyrum tataricum* [D]. Linfen: Shanxi Normal University, 2020. [董馥慧. 不同时期干旱胁迫及复水对不同品种苦荞生长发育的影响 [D]. 临汾: 山西师范大学, 2020.]
- [39] WANG X R, LIU Z X, ZHANG Y J, et al. Evaluation on drought resistance of soybean germplasm resources at multiple growth periods [J]. J Plant Genet Resour, 2021, 22(6): 1582–1594. [王兴荣, 刘章雄, 张彦军, 等. 大豆种质资源不同生育时期抗旱性鉴定评价 [J]. 植物遗传资源学报, 2021, 22(6): 1582–1594. doi: 10.13430/j.cnki.jpgr.20210430002.]
- [40] XU L X. Evaluation of alkaline tolerance of soybean germplasm resources at different growth stages [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018. [徐玲秀. 大豆种质资源不同生育时期耐碱性评价 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.]
- [41] ZHENG D F, LIANG X L, ZUO Y H, et al. Pathogen (*Fusarium oxysporum*) of soybean root rot impacting on biochemical and physiological indexes of soybean seedling [J]. Chin J Oil Crop Sci, 2004, 26(3): 57–61. [郑殿峰, 梁喜龙, 左豫虎, 等. 大豆根腐病菌对大豆幼苗生理生化指标的影响 [J]. 中国油料作物学报, 2004, 26(3): 57–61. doi: 10.3321/j.issn.1007-9084.2004.03.013.]
- [42] ZHOU H B, XU G D, LIU P, et al. Developments of peroxidase isozymes during seed germination of soybean [J]. Seed, 2002(1): 9–12. [周化斌, 徐根娣, 刘鹏, 等. 大豆种子萌发中过氧化物酶同工酶的动态研究 [J]. 种子, 2002(1): 9–12. doi: 10.3969/j.issn.1001-4705.2002.01.003.]
- [43] GUO H L, MA C M, DONG S K, et al. Absorption and utilization of different nitrogen sources during the growth of soybean plant [J]. J Nucl Agric Sci, 2008, 22(3): 338–342. [郭海龙, 马春梅, 董守坤, 等. 春大豆生长中对不同氮源的吸收利用 [J]. 核农学报, 2008, 22(3): 338–342.]
- [44] ZHANG Z Y, LI X, WANG Y, et al. Salt tolerance evaluation and salt tolerance index screening of 59 alfalfa germplasm materials at seedling stage [J]. Acta Agrest Sin, 2020, 28(1): 112–121. [张则宇, 李雪, 王焱, 等. 59 份苜蓿种质材料苗期耐盐性评价及耐盐指标筛选 [J]. 草地学报, 2020, 28(1): 112–121. doi: 10.11733/j.issn.1007-0435.2020.01.013.]
- [45] DUAN Y J, CAO S L, YU T, et al. Identification of salt tolerance during germination of maize inbred lines [J]. Crops, 2022, 38(1): 213–219. [段雅娟, 曹士亮, 于滔, 等. 玉米自交系萌发期耐盐性鉴定 [J]. 作物杂志, 2022, 38(1): 213–219. doi: 10.16035/j.issn.1001-7283.2022.01.032.]