

甜菜种质资源苗期耐旱性综合评价

李王胜^{1,2} 王雪倩^{1,2} 尹希龙^{1,2} 石杨^{1,2} 刘大丽^{1,2} 谭文勃^{1,2} 兴旺^{1,2}

(¹黑龙江大学国家甜菜种质中期库, 150080, 黑龙江哈尔滨; ²黑龙江大学现代农业与生态环境学院, 150080, 黑龙江哈尔滨)

摘要 对336份甜菜种质资源苗期的15个表型和生理生化指标进行测定, 并通过隶属函数、主成分分析、聚类分析和相关性分析方法对甜菜种质资源耐旱性进行综合评价。结果表明, 干旱胁迫后叶干重、株高、根长、叶鲜重、根鲜重、根干重、叶片饱和鲜重和叶片相对含水量等指标均显著降低, 根冠比、可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸含量等4个指标均显著高于对照。主成分分析将15个单一指标转化为6个综合指标, 可代表原始数据信息的75.95%。聚类分析将336份甜菜种质资源分为5个类群, 其中耐旱性强种质16份, 耐旱性较强种质49份, 耐旱性中等种质109份, 耐旱性较弱种质79份, 耐旱性弱种质83份。相关性分析结果显示, 胚轴直径、株高、根长、叶鲜重、根鲜重、根干重、叶干重、叶片饱和鲜重、叶片相对含水量和根冠比与D值呈显著相关性。

关键词 甜菜; 种质资源; 干旱胁迫; 综合评价

甜菜是世界上重要的糖料作物, 也可作为饲料原料^[1], 随着对甜菜的不断研究, 目前发现甜菜具有保健功能, 如在降脂、降压等方面^[2-3], 应用前景十分广泛。种质资源又称遗传资源, 中国保存的种质资源总量突破52万份, 位居世界第二^[4], 我国国家甜菜种质中期库现保存甜菜种质资源1382份^[5], 种质资源作为农业“芯片”在科学研究中越来越受重视。我国甜菜主要种植在新疆、内蒙古和黑龙江等地^[6], 这些地区的年降水量多在400mm以下^[7], 并且近年来全球变暖造成水资源短缺, 干旱成为影响我国甜菜生产的主要非生物因素^[8]。苗期耐旱能力直接影响甜菜的生长以及产量, 因此对甜菜种质资源进行苗期耐旱试验, 筛选出优异的耐旱种质资源, 对促进我国农业发展、加强生态环境安全和可持续发展具有重要意义。

甜菜苗期对水分胁迫的反应可从形态指标和生理生化指标进行鉴定, 前人^[9]研究发现, 结合各指标进行耐旱性综合评价能更科学合理地筛选耐旱种质。目前综合评价的分析方法已经在大豆^[10]、甘蔗^[11]、薏苡^[12]和菜豆^[13]等作物上应用并取得了理想的效果, 甜菜的耐旱研究也有报道^[14-15], 但是应用综合评价的方法对大量甜菜种质资源的耐旱性进行分析的研究鲜有报道。

本研究以336份国家甜菜种质中期库中保存的甜菜种质资源为材料, 通过PEG-6000模拟干旱胁迫对甜菜苗期的株高、根长、可溶性糖和游离脯氨酸含量等15个指标进行分析。通过隶属函数法、主成分分析法、相关分析法和聚类分析法综合评价甜菜种质资源的耐旱性, 试验主要目的是进一步完善甜菜种质资源耐旱评价体系和评价指标, 筛选出苗期耐旱种质资源, 为今后甜菜种质资源耐旱研究以及育种提供材料。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究以国家甜菜种质中期库提供的来源于17个国家的336份甜菜种质资源为材料, 其中中国205份、英国2份、意大利5份、匈牙利2份、瑞典5份、日本9份、俄罗斯16份、美国49份、罗马尼亚2份、荷兰12份、法国3份、德国10份、丹麦1份、朝鲜1份、波兰11份、比利时2份以及奥地利1份。

1.2 试验设计

试验于2021年3-12月在黑龙江大学国家甜菜种质中期库(126°45' E, 45°30' N)智能人工气候室内进行, 以PEG-6000模拟干旱胁迫, 通过实验室

作者简介: 李王胜, 研究方向为甜菜种质资源鉴定, E-mail: 1595764058@qq.com

兴旺为通信作者, 主要从事作物种质资源创新与遗传育种, E-mail: xyjiayou086@163.com

基金项目: 国家作物种质资源库“甜菜分库运行服务”(NCGRC-2021-017); 农业农村部“甜菜种质资源的收集、鉴定、编目、繁种与入库(圃)保存”(1921-26); 国家糖料产业技术体系项目(甜菜种质资源鉴定与新种质创制)(CARS-170102); 黑龙江省自然科学基金项目(LH2019C057); 黑龙江省高校基本科研业务费黑龙江大学专项资金项目(KJCX201920)

收稿日期: 2022-04-21; 修回日期: 2022-06-30; 网络出版日期: 2022-10-09

前期试验设置 9%浓度时胁迫效果显著且未致死，所以确定设置干旱 9% PEG-6000 的 Hoagland 溶液 (DS) 和对照 Hoagland 溶液 (CK) 2 个处理组，重复 3 次。

每份种质挑选 30 颗籽粒饱满、大小均匀的种子，用 75%酒精浸泡 1min 后用自来水冲洗 1min，在 2‰的福美双溶液浸泡 12h，将种子表面残留药物用自来水冲洗干净并播于蛭石中，每天定时喷水，待子叶长出，每份挑选长势一致的幼苗 12 株，洗去根上的蛭石后用海绵定植于 24 孔水培盆（长 37.5cm，宽 25.5cm，高 13.5cm）中，盆中加入 Hoagland 营养液 9L，每 7d 更换 1 次营养液，定植 14d 后（3 对真叶时）进行干旱和对照处理，通过实验室前期试验设置胁迫 2、5 和 7d，7d 时效果最好，所以确定胁迫 7d 后测定最大根长、株高、根鲜重、叶鲜重、叶片饱和鲜重、叶干重、根干重、胚轴直径、叶片相对含水量、根冠比、超氧化物歧化酶（superoxide dismutase, SOD）活性以及可溶性糖、可溶性蛋白、游离脯氨酸和丙二醛含量。

1.3 测定项目与方法

最大根长（root length, RL）和株高（plant height, PH）用直尺测量，根鲜重（root fresh weight, RFW）、叶鲜重（leaf fresh weight, LFW）、叶片饱和鲜重（leaf saturated fresh weight, LSFW）、叶干重（leaf dry weight, LDW）和根干重（root dry weight, RDW）用电子天平称重，胚轴直径（embryonic axis diameter, EAD）使用游标卡尺测量。

叶片相对含水量（relative leaf water, RLW）： $RLW^{[16]}=(LFW-LDW)/(LSFW-LDW)$

根冠比（root-shoot ratio, RSR）： $RSR=RFW/LFW$

使用氮蓝四唑法^[17-19](NBT methods)测定 SOD 活性，使用蒽酮比色法^[20] (anthrone colorimetry) 测定可溶性糖（soluble sugar, SS）含量，使用硫代巴比妥酸法^[20]（TBA 法）测定丙二醛（malondialdehyde, MDA）含量，使用酸性茚三酮法^[20] (acid ninhydrin process) 测定脯氨酸（proline, Pro）含量，使用 BCA 试剂盒测定可溶性蛋白质（soluble protein, SP）含量。

1.4 数据处理

使用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS 26.0 对数据进行处理分析，使用 Origin 2021 画图。参考赵振

宁等^[21]和谢小玉等^[22]的方法，根据所测量的指标计算耐旱系数（drought resistance coefficient, DC）、隶属函数值 $[\mu(X_i)]$ 和耐旱性度量值（drought tolerance measurement, D）。使用 Origin 2021 系统聚类中的 Ward 法对甜菜种质资源 D 值进行聚类分析，并对 D 值和各指标耐旱系数进行相关性分析。

分析中涉及的计算公式如下：

$DC = \text{干旱胁迫下测定值} / \text{对照处理下测定值} \quad (1)$

$\mu(X_i) = (X_i - X_{i \min}) / (X_{i \max} - X_{i \min}) \quad (2)$

式中， X_i 为第 i 个指标干旱处理后与对照处理的相对值， $X_{i \min}$ 和 $X_{i \max}$ 分别表示第 i 个指标耐旱系数的最小值和最大值。

$F(X_j) = a_{1j}X_{1j} + a_{2j}X_{2j} + \dots + a_{ij}X_{ij} \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n) \quad (3)$

式中， $F(X_j)$ 表示第 j 个综合指标值， a_{ij} 表示各指标所对应的特征值， X_{ij} 为各指标标准化处理的值。

$W_j = P_j / \sum_{j=1}^n P_j \quad (4)$

式中， W_j 表示第 j 个综合指标在所有综合指标中所占的权重， P_j 表示各种质第 j 个综合指标的方差贡献率。

$D = \sum_{j=1}^n [F(X_j) \times W_j] \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (5)$

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对各指标的影响

由图 1 可知，PEG-6000 模拟干旱胁迫条件下，336 份甜菜种质资源的胚轴直径、叶干重、株高、根长、叶鲜重、根鲜重、根干重、叶片饱和鲜重和叶片相对含水量等表型性状均极显著低于对照，干旱胁迫后根冠比、SS、SP 和 Pro 含量等 4 个指标均极显著高于对照；SOD 活性和 MDA 含量在干旱和对照处理下差异并不显著。不同甜菜种质的各指标在干旱胁迫后变化趋势不同，很难根据单一指标的变化情况客观、准确地比较不同甜菜种质耐旱情况，应该运用多指标综合评价的方法。

2.2 主成分分析

由表 1 可知，前 6 个主成分因子可代表全部信息的 75.95%，其中 $\lambda > 0.918$ 。根据结果可将原有的 15 个指标转化为 6 个相互独立的综合指标。第 1 主成分的贡献率为 36.47%，其中胚轴直径、叶鲜重、根鲜重、根干重、叶干重和叶片饱和鲜重等指标的载荷系数绝对值较大，说明第 1 主成分主要反

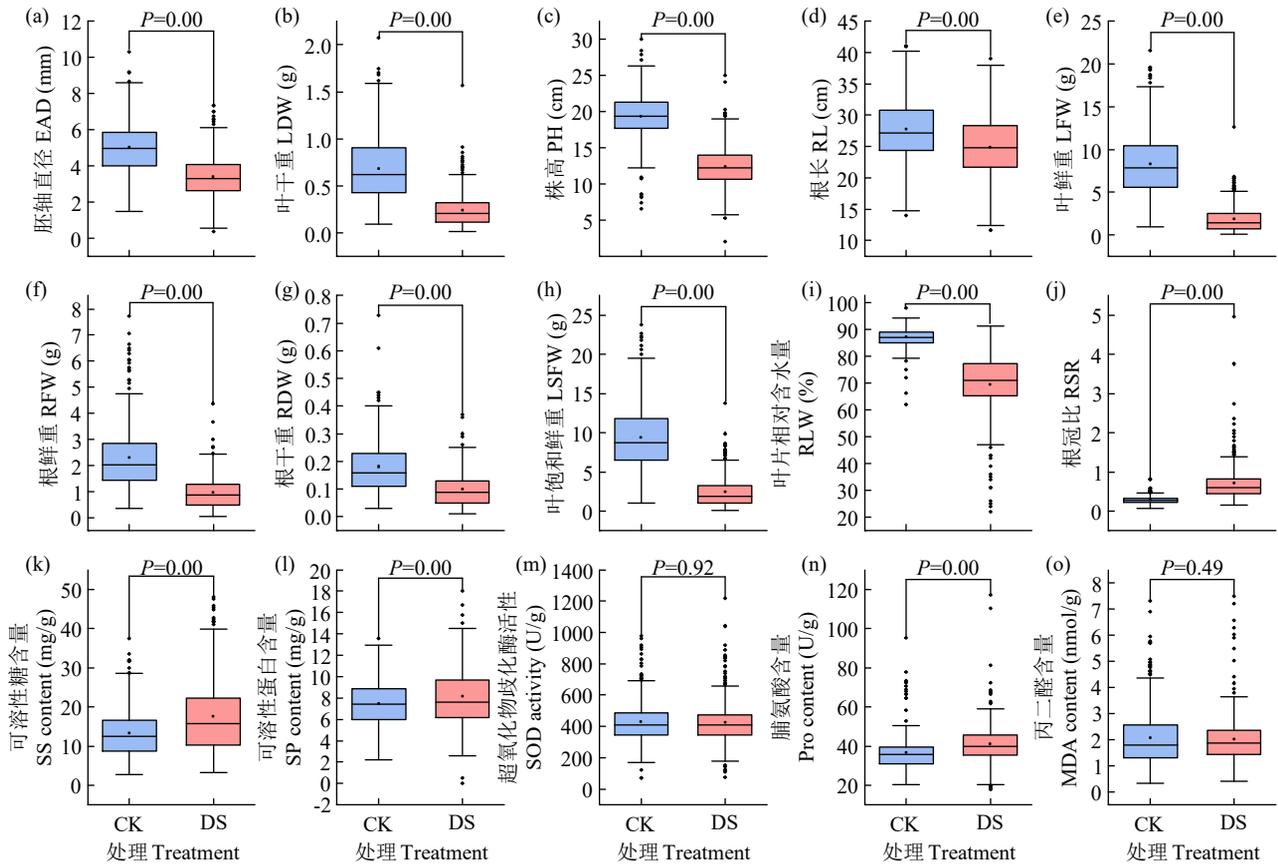


图 1 干旱胁迫对 336 份甜菜种质资源各指标的影响

Fig.1 Effects of drought stress on indexes of 336 sugar beet germplasm resources

表 1 甜菜种质资源各指标的主成分分析

Table 1 Principal component analysis of various indexes of sugar beet germplasm resources

指标 Index	F1	F2	F3	F4	F5	F6
胚轴直径 EAD	0.36	0.08	0.14	0.09	0.01	0.10
株高 PH	0.29	-0.03	0.09	-0.21	0.13	-0.16
根长 RL	0.18	-0.10	0.19	-0.20	-0.06	-0.61
叶鲜重 LFW	0.40	0.04	-0.14	0.00	-0.03	0.03
根鲜重 RFW	0.38	-0.07	0.21	0.11	0.02	0.13
根干重 RDW	0.34	-0.02	0.18	0.19	-0.00	0.20
叶干重 LDW	0.37	0.07	-0.04	0.07	-0.02	-0.01
叶片饱和鲜重 LSFW	0.40	0.01	-0.10	0.00	-0.04	0.02
叶片相对含水量 RLW	0.14	0.17	-0.47	-0.16	0.12	0.15
根冠比 RSR	-0.11	-0.20	0.56	0.38	0.02	0.23
可溶性糖含量 SS content	-0.02	0.55	-0.16	0.31	-0.36	-0.10
可溶性蛋白含量 SP content	-0.05	0.58	0.20	0.13	-0.19	0.14
超氧化物歧化酶活性 SOD activity	-0.01	0.23	0.30	-0.72	-0.02	0.46
脯氨酸含量 Pro content	-0.01	0.34	0.38	-0.16	0.02	-0.47
丙二醛含量 MDA content	-0.03	0.32	0.01	0.17	0.90	-0.04
特征根 Characteristic root	5.47	1.66	1.41	1.00	0.94	0.92
累计贡献率 Cumulative contribution rate (%)	36.47	47.52	56.88	63.56	69.82	75.95
因子权重 Factor weight	0.48	0.15	0.12	0.09	0.08	0.08

映的是生物量信息；第 2 主成分的贡献率为 11.05%，其中 SS 和 SP 的载荷系数绝对值较大，说明第 2 主成分主要反映的是渗透调节物质的信息；

第 3 主成分的贡献率为 9.36%，其中根长、叶片相对含水量和根冠比的载荷系数较大，说明第 3 主成分主要反映的是干旱胁迫下会增长的表型指标；第

4 主成分的贡献率为 6.68%，其在 SOD 上有较高载荷系数；第 5 主成分的贡献率为 6.26%，其在 MDA 含量上有较高载荷系数；第 6 主成分的贡献率为 6.12%，其在 Pro 含量上有较高载荷系数。

由主成分分析（图 2）可将 336 份种质大致分成 3 个类群，类群 1 是耐旱表现较好的种质，包括 10、79、84、85、124、182、230、251、293 和 298 号等 10 份；类群 3 是耐旱表现较差的种质，包括 42、133、144、229 和 267 号等 5 份；类群 2 的种质耐旱性介于类群 1 和类群 3 之间。

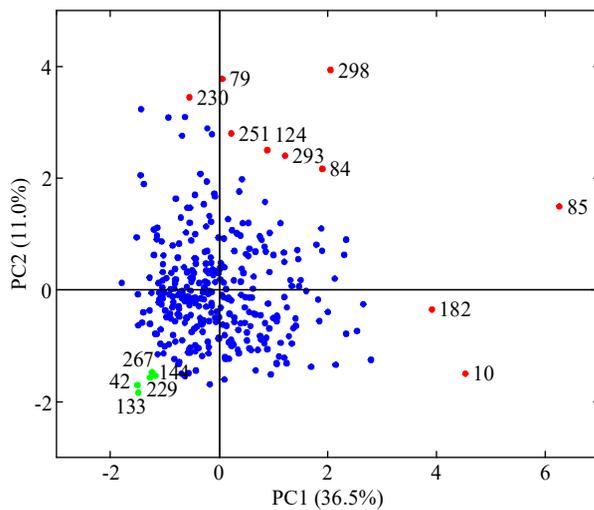


图 2 336 份甜菜种质资源各指标主成分分析
Fig.2 Principal component analysis of indexes of 336 sugar beet germplasm resources

2.3 耐旱性综合评价

通过公式(1)计算耐旱系数，利用公式(2)和(3)计算各种质的综合指标值，再结合公式(4)计算各综合指标的权重，最后根据公式(5)得到各甜菜种质资源的耐旱性度量值 (D)（图 3），336 份甜菜种质资源 D 值介于 0.135~1.289，平均值为 0.392， D 值越大表示该甜菜种质耐旱性越强。耐旱性突出的种质有 10、85 和 182 号等，耐旱性弱的种质有 42、133 和 310 号。 D 值计算耐旱性的结果与主成分分析结果基本吻合。

2.4 甜菜种质资源耐旱性聚类分析

对 336 份甜菜种质资源 D 值进行聚类分析（图 4），共分为 5 类。第 I 类为耐旱性强种质，有 16 份，占总数的 4.76%， D 值平均值为 0.806；第 II 类为耐旱性较强的种质，有 49 份，占总数的 14.58%， D 值平均值为 0.564；第 III 类为耐旱性中等的种质，有 109 份，占总数的 32.44%， D 值变化范围为

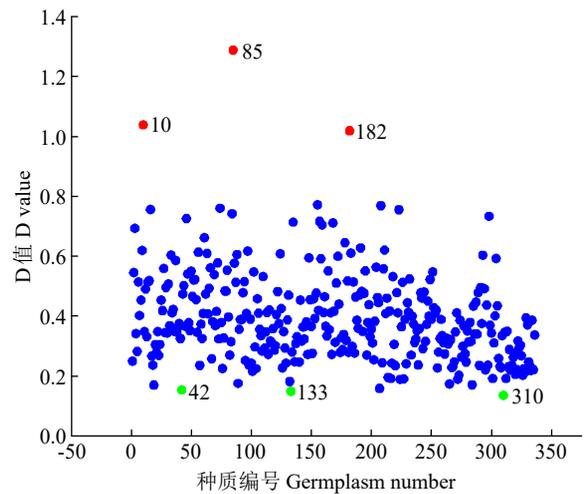


图 3 336 份甜菜种质资源 D 值散点图
Fig.3 Scatter plot of D values of 336 sugar beet germplasm resources

0.363~0.501；第 IV 类为耐旱性较弱的种质，有 79 份，占总数的 23.51%， D 值平均值为 0.326；第 V 类为耐旱性弱的种质，有 83 份，占总数的 24.70%， D 值变化范围为 0.135~0.283。

2.5 D 值与各指标的相关性分析

根据相关性分析结果（图 5）可知，表型指标除叶片相对含水量和根冠比外其余各指标间均表现出显著正相关；根冠比与株高、叶鲜重、叶干重和叶片相对含水量呈显著负相关。表型指标与生理指标间除叶片相对含水量与 SS 间呈极显著相关外其余各指标间均无显著相关性。生理生化指标中渗透调节物质含量间呈极显著正相关，MDA 含量与 SP 含量呈显著正相关，SOD 活性与 SP 和 Pro 含量均呈显著正相关。 D 值与 10 个表型指标均表现出显著相关性，其中， D 值与胚轴直径、株高、根长、叶鲜重、根鲜重、根干重、叶干重、叶片饱和鲜重和叶片相对含水量呈显著正相关， D 值与根冠比呈显著负相关， D 值与 5 个生理生化指标均无显著相关性。

3 讨论

3.1 耐旱性评价方法的选择

在对植物的耐旱性进行评价时，如果只采取等权重的综合评价方法往往会忽略了各指标不同的重要程度，目前大多数学者都会采用多种方法相结合进行评价，本研究参考赵振宁等^[21]和谢小玉等^[22]对耐旱研究的综合评价方法，采用隶属函数值法和抗旱性度量值法结合抗旱系数对 336 份甜菜种质资

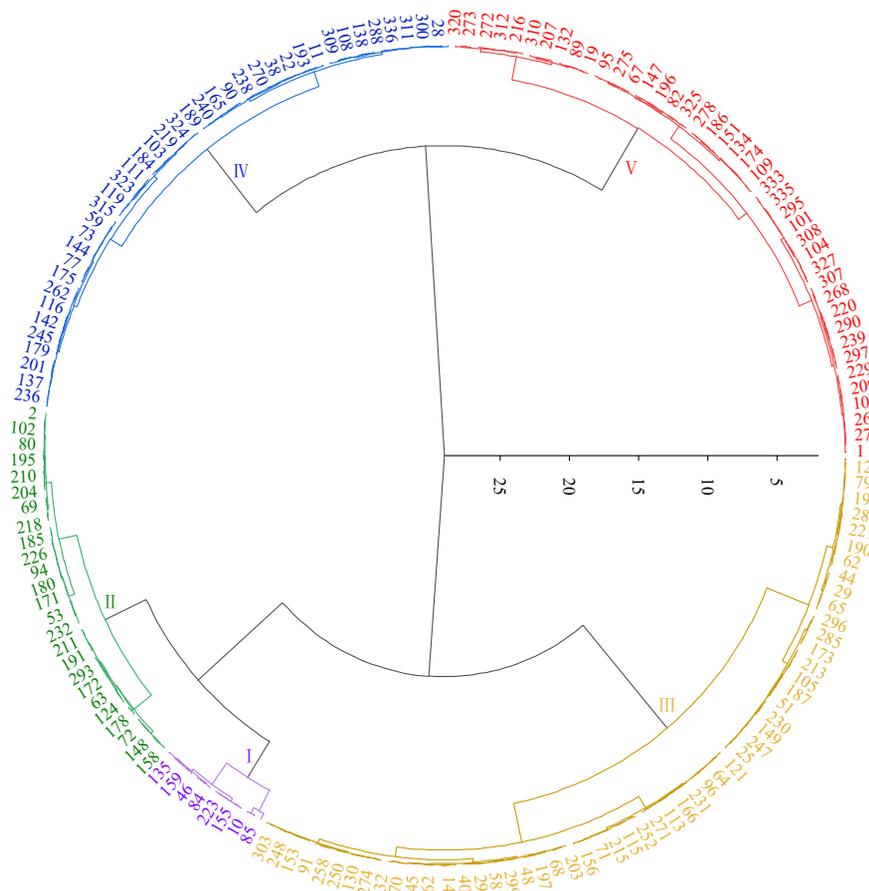


图 4 336 份甜菜种质资源耐旱性分析聚类图

Fig.4 Cluster diagram of drought tolerance analysis of 336 sugar beet germplasm resources

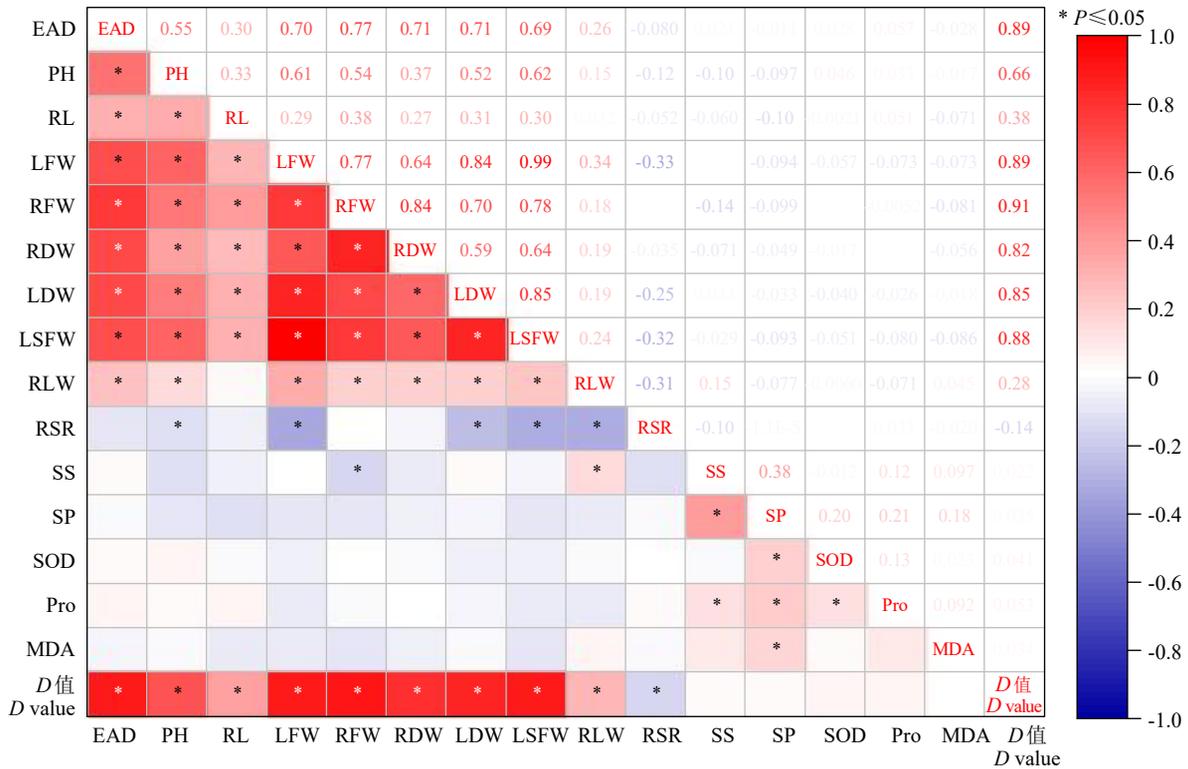


图 5 耐旱性度量 D 值与各耐旱系数指标的相关性分析

Fig.5 Correlation analysis between D value of drought tolerance measure and drought tolerance coefficient of each index

源进行主成分分析^[23]、聚类分析^[17]、综合评价分析和相关性分析^[24]，从而客观、具体、准确地对 336 份甜菜种质资源的耐旱性进行评价，使鉴定结果更接近真实情况。

本研究通过以上方法得出各甜菜种质资源的 D 值与主成分分析结果高度符合，也从侧面印证了综合评价方法的可靠性。最终将甜菜种质资源的耐旱性分别为 5 个类群，筛选出耐旱型甜菜种质 16 份，这一结果与汪灿等^[12]在薏苡中的研究结果一致。本研究鉴定出的耐旱材料可作为优良的甜菜种质资源加入到国家甜菜种质中期库的核心种质中，以便在今后新品种培育中加以利用。

3.2 干旱对甜菜种质资源表型和生理生化指标的影响

干旱胁迫可对植物的基因表达、代谢和生长变化产生影响，这些影响往往在几秒钟、几小时和几天内显现出来，但是这些变化中最先被观察到的是生长变化的影响^[25]，所以在干旱研究中表型指标至关重要。本研究的 10 个表型指标中有 9 个在经过干旱胁迫后是显著下降的，只有根冠比在干旱胁迫后显著增加，这表明干旱胁迫对表型指标的影响是显著的，可利用以上表型指标对甜菜种质资源进行耐旱性评价。

植物应对干旱的主要生理生化表现有抗氧化酶系统、渗透调节、活性氧代谢和产生抗逆蛋白等^[26]。游离脯氨酸是植物体内重要的渗透调节物质和自由基清除剂^[27]，SOD 可降低活性氧对植物的损伤^[28]，MDA 能够反映植物体内活性氧物质对质膜透性的损失程度^[26]，渗透调节物质可以降低植物体内渗透势，从而降低水势，提高从外界吸收水分的能力^[29]。本研究中，干旱胁迫后 SS、SP 和 Pro 含量显著上升，SOD 活性和 MDA 含量变化不显著，可能是干旱胁迫后这 2 个指标升高和降低的种子数量相当，这 2 个指标对干旱胁迫的敏感性在不同甜菜种质中表现不同。

3.3 甜菜耐旱性评价指标的选择

植物的耐旱性是一个复杂的过程，不同的指标对干旱胁迫反应的敏感性和速度不同，植物在应对干旱胁迫时会随着胁迫的时间呈现出阶段性的特点，根系在感受到胁迫信号后，通过信号传导调节体内酶活性和渗透调节物质的表达，进而影响表型指标，使植物来适应外界胁迫^[30-32]，本研究通过对 336 份甜菜种质资源胁迫 7d 后的各指标的耐旱系

数和 D 值进行相关性分析，发现 D 值与所测的 5 个生理生化指标（SS、SP、SOD、Pro 和 MDA）均无显著相关性，与 10 个表型指标（EAD、PH、RL、LFW、RFW、RDW、LDW、LSFW、RLW 和 RSR）均表现出显著相关性，在长时间的干旱胁迫下甜菜种质耐旱鉴定可依据表型指标进行，这一结果与路之娟等^[33]在苦荞中的研究结果相似。 D 值与根鲜重、胚轴直径和叶鲜重的相关系数分别为 0.91、0.89 和 0.89，在大田试验中可以依据地上部指标叶鲜重、地下部指标根鲜重和胚轴直径这 3 个指标对甜菜种质耐旱性快速、有效地进行鉴定。

4 结论

本研究通过对 336 份甜菜种质资源苗期耐旱性进行分析，对 D 值进行聚类分析，筛选出 16 份苗期耐旱性强的甜菜种质。并根据相关性分析确定了 D 值与胚轴直径、株高、根长、叶鲜重、根鲜重、根干重、叶干重、叶片饱和鲜重和叶片相对含水量呈显著正相关， D 值与根冠比呈显著负相关，本研究结果可以为甜菜抗旱育种提供材料和理论基础。

参考文献

- [1] 罗振福, 贺建华, 谭碧娥. 甜菜粕的资源化利用及其在猪营养中的应用. 家畜生态学报, 2020, 41(1): 81-85.
- [2] 赵狄, 练桂丽, Morris R J, et al. 少量无机硝酸盐或甜菜根可有效抑制盐诱发的血压升高. 中华高血压杂志, 2019, 27(6): 590.
- [3] 丁一上, 杨德林, 吴越, 等. 盐酸甜菜碱的降压作用及其机理. 石河子医学院学报, 1993(2): 65-69, 73.
- [4] 蔡东明, 陈耀锋, 王长发, 等. 我国农作物种质资源储备现状与分析. 农业与技术, 2021, 41(1): 8-10.
- [5] 王茂琴, 崔平. 我国收集保存甜菜种质资源的数量与类型分析. 中国甜菜糖业, 2006(3): 36-39.
- [6] 刘华君, 王燕飞, 李翠芳, 等. 我国甜菜抗旱与耐盐性研究进展. 中国糖料, 2010(4): 52-54, 58.
- [7] 刘凯, 聂格格, 张森. 中国 1951-2018 年气温和降水的时空演变特征研究. 地球科学进展, 2020, 35(11): 1113-1126.
- [8] 张净, 王锦霞, 郭萌萌, 等. 甜菜幼苗对干旱胁迫的适应机制. 中国农学通报, 2020, 36(32): 1-7.
- [9] 王兴荣, 张彦军, 李玥, 等. 干旱胁迫对大豆生长的影响及抗旱性评价方法与指标筛选. 植物遗传资源学报, 2018, 19(1): 49-56.
- [10] 张海平, 张俊峰, 陈妍, 等. 大豆种质资源萌发期耐旱性评价. 植物遗传资源学报, 2021, 22(1): 130-138.
- [11] 田春艳, 边芯, 俞华先, 等. 云南甘蔗创新亲本抗旱性综合评价. 植物遗传资源学报, 2019, 20(3): 610-623.
- [12] 汪灿, 周棱波, 张国兵, 等. 薏苡种质资源萌发期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选. 植物遗传资源学报, 2017, 18(5): 846-859.
- [13] 曾辉, 曹苑南, 王述民, 等. 30 份普通菜豆苗期抗旱性鉴定及抗旱指标的确定. 植物遗传资源学报, 2016, 17(6): 1014-1021.
- [14] 李国龙, 孙亚卿, 邵世勤, 等. 甜菜幼苗叶片抗氧化系统对干旱胁迫的响应. 作物杂志, 2017(5): 73-79.

- [15] 李国龙, 孙亚卿, 邵世勤, 等. 甜菜幼苗叶片渗透调节系统及部分激素对干旱胁迫的响应. 江苏农业科学, 2018, 46(7): 80-84.
- [16] Aghaiee N, Zarei L, Cheghamirza K. Evaluation of some morpho-physiological characteristics in strawberry under different moisture stress regimes. *Journal of Berry Research*, 2019, 9(1): 83-93.
- [17] 原小燕, 铁朝良, 符明联, 等. 甘芥种间杂交后代 DH 系花期抗旱性评价. 干旱地区农业研究, 2017, 35(2): 79-88.
- [18] Sukmarani D, Proklamasiningsih E, Susanto A H, et al. Superoxide dismutase (SOD) activity of *Cerriops zippeliana* in Segara Anakan Cilacap (Indonesia) under heavy metal accumulation. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 2021, 22(12): 5627-5635.
- [19] Artyszak A, Gozdowski D, Kucińska K. Impact of foliar fertilization on the content of silicon and macronutrients in sugar beet. *Plants*, 2019, 8(5): 136.
- [20] Sánchez F J, Manzanares M, de Andres E F, et al. Turgor maintenance, osmotic adjustment and soluble sugar and proline accumulation in 49 pea cultivars in response to water stress. *Field Crops Research*, 1998, 59(3): 225-235.
- [21] 赵振宁, 赵宝颢. 不同大豆品种在萌发期对干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价. 干旱地区农业研究, 2018, 36(2): 131-136.
- [22] 谢小玉, 张霞, 张兵. 油菜苗期抗旱性评价及抗旱相关指标变化分析. 中国农业科学, 2013, 46(3): 476-485.
- [23] 李小明, 田宏先, 王瑞霞. 灰色关联度分析和主成分分析在油菜抗旱育种中的应用. 种子, 2021, 40(9): 92-97.
- [24] 李阳阳, 李驰, 任俊洋, 等. 甘蓝型油菜苗期耐旱性综合评价与耐旱性鉴定指标筛选. 中国生态农业学报, 2021, 29(8): 1327-1338.
- [25] Kuromori T, Fujita M, Takahashi F, et al. Inter-tissue and inter-organ signaling in drought stress response and phenotyping of drought tolerance. *The Plant Journal*, 2022, 109(2): 342-358.
- [26] Karimi A, Tabari Kouchaksaraei M, Neirynek J. Drought stress tolerance in seedlings of four deciduous species, common in nurseries of semi-arid region of Iran. *Ecopersia*, 2022, 10(2): 165-172.
- [27] Rejeb K B, Abdelly C, Savouré A. How reactive oxygen species and proline face stress together. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2014, 80: 278-284.
- [28] Zou T, Lin R, Pu L, et al. Genome-wide identification, structure characterization, expression pattern profiling, and substrate specificity of the metal tolerance protein family in *Canavalia rosea* (Sw.) DC. *Plants*, 2021, 10(7): 1340.
- [29] Ozturk M, Turkyilmaz Unal B, García-Caparrós P, et al. Osmoregulation and its actions during the drought stress in plants. *Physiologia Plantarum*, 2021, 172(2): 1321-1335.
- [30] 甄子龙, 侯建华, 伊六喜, 等. 向日葵种质资源苗期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选. 干旱地区农业研究, 2021, 39(4): 228-238.
- [31] Li P, Ma B, Palta J A, et al. Wheat breeding highlights drought tolerance while ignores the advantages of drought avoidance: A meta-analysis. *European Journal of Agronomy*, 2021, 122: 126196.
- [32] Yang X, Lu M, Wang Y, et al. Response mechanism of plants to drought stress. *Horticulturae*, 2021, 7(3): 50.
- [33] 路之娟, 张永清, 张楚, 等. 不同基因型苦荞苗期抗旱性综合评价及指标筛选. 中国农业科学, 2017, 50(17): 3311-3322.

Comprehensive Evaluation of Drought Tolerance of Sugar Beet Germplasms at Seedling Stage

Li Wangsheng^{1,2}, Wang Xueqian^{1,2}, Yin Xilong^{1,2},
Shi Yang^{1,2}, Liu Dali^{1,2}, Tan Wenbo^{1,2}, Xing Wang^{1,2}

(¹National Medium-Term Repository of Sugar Beet Germplasm, Heilongjiang University, Harbin 150080, Heilongjiang, China; ²College of Advanced Agriculture and Ecological Environment, Heilongjiang University, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

Abstract In this study, 336 sugar beet germplasm resources were measured at the seedling stage along with 15 phenotypic, physiological and biochemical indices, and the drought tolerance of these resources was thoroughly assessed using the affiliation function method, principal component analysis, cluster analysis and correlation analysis. The results showed that the indicators of leaf dry weight, plant height, root length, leaf fresh weight, root fresh weight, root dry weight, leaf saturated fresh weight and leaf relative water content were significantly decreased, and root to crown ratio, soluble sugar content, soluble protein content and proline content under drought stress were significantly higher than the control. The principal component analysis transformed the 15 single indicators into six composite indicators that could represent 75.95% of the original data information. Cluster analysis divided the 336 sugar beet germplasm resources into five groups, including 16 germplasms with strong drought tolerance, 49 with relatively strong drought tolerance, 109 with medium drought tolerance, 79 with relatively weak drought tolerance and 83 with weak drought tolerance. Correlation analysis showed that embryonic axis diameter, plant height, root length, leaf fresh weight, root fresh weight, root dry weight, leaf dry weight, leaf saturated fresh weight, relative leaf water content and root-shoot ratio were significantly correlated with *D* values.

Key words Sugar beet; Germplasm resources; Drought stress; Comprehensive evaluation