

油莎豆种质资源苗期抗旱性鉴定与评价

王亚茹^{1,2},杨向东²,赵寒冬³,牛陆²,
张原宇²,杨春明²,任伟²

(1.吉林师范大学生命科学学院,吉林 四平 136000;2.吉林省农业科学院,吉林 长春 130124;3.长春农业博览园,吉林 长春 130000)

摘要:油莎豆(*Cyperus esculentus* L.)是一种新型生态经济型作物,开展油莎豆种质资源抗旱筛选与评价可为选育适沙抗旱新品种提供依据。本研究通过室内盆栽试验,测定39份油莎豆种质在正常灌溉和自然干旱胁迫条件下的17个表型和生理指标。采用相关性分析、主成分分析、隶属函数及聚类分析相结合的方法,对油莎豆苗期抗旱性进行综合评价。结果表明:干旱胁迫对油莎豆的叶宽、叶厚和根长具有显著影响($P<0.05$),对株高、分蘖数、地上干重、地下干重和总干重具有极显著影响($P<0.01$),不同种质材料间的变异系数介于0.148~0.584。5个主成分可以代表原17个指标74.174%的数据量。叶宽、枯叶率、根长、鲜重、干重、根冠比可以作为抗旱评价主要指标。聚类分析可将39份油莎豆种质由强到弱分为4个等级,1~4级分别含有2、10、16、11份种质。抗旱性度量值可作为油莎豆抗旱评价的适宜指标,基于此筛选出苗期抗旱性强的油莎豆种质资源为JYD-39、JYD-34和JYD-28。

关键词:油莎豆;种质评价;幼苗期;抗旱性;隶属函数

中图分类号:S545 文献标志码:A

Characterization and assessment of drought resistance in tigernut germplasm resources at seedling stage

WANG Yaru^{1,2}, YANG Xiangdong², ZHAO Handong³, NIU Lu²,
ZHANG Yuanyu², YANG Chunming², REN Wei²

(1. School of Life Science, Jilin Normal University, Siping, Jilin 136000, China;

2. Agricultural Biotechnology Institute, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

3. Changchun Agricultural Expo Garden, Changchun, Jilin 130000, China)

Abstract: Tigernut (*Cyperus esculentus* L.) is a multipurpose cultivated crop with high eco-economic value. Characterization and assessment of drought resistance in tigernut germplasm resources can greatly facilitate the development of varieties adapted to the arid and semi-arid sandy land widely distributed in China. In the present study, a total of 39 Tigernut accessions were tested for 17 phenotypical and physiological traits under the treatment of normal irrigation and drought stress in indoor pot-planting experiment. Comprehensive assessment of drought resistance at seedling stage for these accessions was carried out by using correlation, principal component, membership function, and cluster analysis. The results showed that the effects of drought were significant on the width and thickness of leaf and root length ($P<0.05$), and extremely significant on plant height, tiller number, dry weight of root and leaf, and total dry weight of plants ($P<0.01$). The coefficient of variation among different germplasms ranged from 0.148 to 0.584. The results of principal component analysis using 17 phenotypical and physiological variables indicated that the first 5 principal components accounted for 74.174% of the total variation among these accessions. Leaf width, leaf yellowing rate, root length, fresh and dry weight, and crown root ratio were suitable as comprehensive criteria for evaluating drought resistance of Tigernut. Cluster analysis produced four major clusters based on

their resistance to drought stress, with cluster I containing 2 accessions, cluster II containing 10 accessions, cluster III and cluster IV containing 16 and 11 accessions, respectively. Comprehensive evaluation value was an appropriate index for assessing drought resistance of Tigernut accessions. Based on the results of comprehensive assessment of drought resistance, 3 Tigernut accessions (JYD-39, JYD-34 and JYD-28) were identified as the germplasm with higher resistance to drought stress at seedling stage.

Keywords: *Cyperus esculentus*; germplasm assessment; seedling stage; drought resistance; membership function

油莎豆(*Cyperus esculentus* L.)属莎草科莎草属一年生C4植物,原产于非洲尼罗河流域和地中海沿岸,是一种集粮、油、饲于一体且综合利用价值高、开发潜力大的新兴经济作物^[1-2]。油莎豆地下块茎富含淀粉(25%~40%)、油脂(20%~30%)、糖类(15%~20%)、蛋白质(5%~10%)、膳食纤维(8%~10%)等营养物质^[3-4],被誉为“油料作物之王”。此外,作为一种沙生植物,它具有根系发达、分蘖力强、耐瘠薄、病虫害少等特点,是一种优质防风固沙及生态修复植物,对于开发利用沙化土地、荒地、滩涂地等边际土地具有重要战略意义^[5-6]。

近年来随着全球气候变化频繁、水资源消耗加剧、水文生态恶化等问题突出,干旱已成为制约油莎豆生长发育的主要非生物胁迫之一。适时开展油莎豆种质资源抗旱性筛选与评价进而选育抗旱新品种迫在眉睫。植物抗旱性不仅受多基因调控,而且是多方面、多层次、多途径综合作用的结果^[7]。已有学者采用抗旱性度量值、频次分析、相关性分析、主成分分析、隶属函数、聚类分析、灰色关联度分析、逐步回归等相结合的方法,对玉米^[8-9]、小麦^[10-11]、大豆^[12]、棉花^[13]、绿豆^[14]、苜蓿^[15-16]、柱花草^[17]等主要农作物和牧草开展了抗旱性研究并取得诸多进展。这些研究主要针对作物萌发期、幼苗期和成株期的形态特征、超微结构、生理生化、农艺性状进行鉴定评价,但有关油莎豆种质资源抗旱鉴定与评价的研究鲜见报道。

因此,本研究在前期广泛收集国内外油莎豆种质资源的基础上,通过室内盆栽自然干旱的方法,对39份油莎豆种质资源幼苗期的17个形态和生理指标进行测定,并结合综合评价的方法,明确油莎豆主要抗旱指标,划分抗旱等级,筛选抗旱种质资源。研究成果可为进一步选育抗旱新品种及解析其耐旱分子调控机制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试油莎豆种质资源39份,其中32份来自国内湖北、河南、江苏、吉林和北京等地区,7份引自国外马里、喀麦隆、俄罗斯和西班牙(表1)。块茎形状有圆粒

型(粒径比1.0~1.2)、椭圆型(粒径比1.3~1.5)和长粒型(粒径比>1.5)。块茎颜色主要为黄色和红色。

1.2 试验设计

于2021年7月在吉林省农业科学院温室播种油莎豆块茎,保持基质湿润,待幼苗长到三叶一心时,选取长势一致植株进行移栽。试验花盆直径12 cm,高10 cm,每盆装土0.43 kg,土壤为砂壤土,每盆移栽1株幼苗,土壤最大持水量为45.17%±3.58%。室内生长条件为光照27℃/16 h,黑暗22℃/8 h。设置正常灌溉(CK)和干旱胁迫(T)2个处理,每个处理4个重复,所有植株正常供水,使土壤含水量保持在30.00%±3.00%。正常生长30 d后,CK处理继续正常供水,T处理则停止供水,待自然干旱15 d,土壤含水量降至5.00%±2.00%时,开始测定各项指标。

1.3 测定指标及方法

处理15 d后,使用土壤水分速测仪(TDR150, Spectrum, USA)测得CK处理土壤水分含量为32.80%±2.37%,T处理土壤水分含量为3.30%±0.68%,测定生物性状指标。

形态指标:参照《牧草种质资源描述规范和数据标准》^[18]分别测量株高、叶宽、叶厚、茎粗、分蘖数、根长及地上与地下物质鲜重、干重,并计算总鲜重、总干重和根冠比。

叶绿素:使用叶绿素仪(SPAD-502 Plus, KONICA MINOLTA, Japan)测定油莎豆叶片相对叶绿素含量SPAD值。

枯叶率:采用目测法,计算处理15 d时油莎豆的枯叶率^[17]。

组织含水量:参照《牧草种质资源描述规范和数据标准》^[18]测定油莎豆叶片水分含量。

1.4 数据处理

利用Microsoft Excel 2016进行数据整理,采用SPSS 26.0进行数据统计分析。

分别按照公式(1)和(2)计算干旱胁迫下油莎豆某项指标的抗旱系数(drought resistance coefficient, DC)及综合抗旱系数(comprehensive drought resistance coefficient, CDC)^[19]。

表 1 供试 39 份油莎豆种质资源
Table 1 Thirty-nine Tigernut germplasm resources collected in this study

编号 Serial number	资源名称 Resource name	粒形 Grain shape	粒色 Grain color	来源地 Origin
1	JYD-1	长粒型 Long-grained	黄色 Yellow	中国湖北 Hubei, China
2	JYD-2	椭圆型 Oval	黄色 Yellow	中国湖北 Hubei, China
3	JYD-3	长粒型 Long-grained	黄色 Yellow	中国湖北 Hubei, China
4	JYD-4	椭圆型 Oval	黄色 Yellow	中国湖北 Hubei, China
5	JYD-5	长粒型 Long-grained	黄色 Yellow	中国湖北 Hubei, China
6	JYD-6	圆粒型 Round grain	黄色 Yellow	中国湖北 Hubei, China
7	JYD-7	长粒型 Long-grained	黄色 Yellow	中国湖北 Hubei, China
8	JYD-8	椭圆型 Oval	黄色 Yellow	中国湖北 Hubei, China
9	JYD-9	椭圆型 Oval	黄色 Yellow	中国湖北 Hubei, China
10	JYD-10	椭圆型 Oval	黄色 Yellow	中国湖北 Hubei, China
11	JYD-12	长粒型 Long-grained	黄色 Yellow	中国湖北 Hubei, China
12	JYD-13	椭圆型 Oval	黄色 Yellow	中国湖北 Hubei, China
13	JYD-14	长粒型 Long-grained	黄色 Yellow	中国湖北 Hubei, China
14	JYD-15	长粒型 Long-grained	黄色 Yellow	中国河南 Henan, China
15	JYD-16	圆粒型 Round grain	黄色 Yellow	中国河南 Henan, China
16	JYD-17	椭圆型 Oval	黄色 Yellow	中国河南 Henan, China
17	JYD-18	椭圆型 Oval	黄色 Yellow	中国河南 Henan, China
18	JYD-19	椭圆型 Oval	黄色 Yellow	中国河南 Henan, China
19	JYD-20	长粒型 Long-grained	黄色 Yellow	中国河南 Henan, China
20	JYD-21	圆粒型 Round grain	黄色 Yellow	中国江苏 Jiangsu, China
21	JYD-22	椭圆型 Oval	黄色 Yellow	中国江苏 Jiangsu, China
22	JYD-23	圆粒型 Round grain	黄色 Yellow	中国吉林 Jilin, China
23	JYD-24	圆粒型 Round grain	黄色 Yellow	中国吉林 Jilin, China
24	JYD-25	椭圆型 Oval	黄色 Yellow	中国吉林 Jilin, China
25	JYD-26	圆粒型 Round grain	黄色 Yellow	中国河北 Hebei, China
26	JYD-27	长粒型 Long-grained	黄色 Yellow	中国河北 Hebei, China
27	JYD-28	圆粒型 Round grain	黄色 Yellow	中国河北 Hebei, China
28	JYD-29	长粒型 Long-grained	黄色 Yellow	中国吉林 Jilin, China
29	JYD-30	圆粒型 Round grain	黄色 Yellow	中国吉林 Jilin, China
30	JYD-31	椭圆型 Oval	黄色 Yellow	中国湖北 Hubei, China
31	JYD-33	椭圆型 Oval	黄色 Yellow	马里 Mali
32	JYD-34	圆粒型 Round grain	红色 Red	喀麦隆 Cameroon
33	JYD-35	椭圆型 Oval	黄色 Yellow	喀麦隆 Cameroon
34	JYD-36	椭圆型 Oval	黄色 Yellow	喀麦隆 Cameroon
35	JYD-39	椭圆型 Oval	黄色 Yellow	中国河北 Hebei, China
36	JYD-40	长粒型 Long-grained	黄色 Yellow	中国河北 Hebei, China
37	JYD-41	长粒型 Long-grained	黄色 Yellow	俄罗斯 Russia
38	JYD-42	椭圆型 Oval	黄色 Yellow	西班牙 Spain
39	JYD-45	椭圆型 Oval	黄色 Yellow	中国北京 Beijing, China

$$DC = \text{干旱胁迫处理值} / \text{正常浇水处理值} \quad (1)$$

$$CDC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n DC \quad (2)$$

基于以上油莎豆干旱胁迫的 DC 值, 进行相关性分析和主成分分析。按公式(3)、(4) 和(5) 分别计算因子权重系数(V_i)、各材料各综合指标的隶属函数值 [$\mu(x_i)$] 和抗旱性度量值(drought resistance comprehensive evaluation value, D), 而后针对 D 进行聚类分析划分抗旱级别, 结合排序和聚类分析结果筛选抗旱种质资源。

$$V_i = P_i / \sum_{i=1}^n P_i \quad (3)$$

$$\mu(x_i) = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (4)$$

$$D = \sum_{i=1}^n [\mu(x_i) \times V_i] \quad (5)$$

式中, P_i 为第 i 综合指标贡献率, 表示第 i 指标在所有指标中的重要程度, x_i 、 x_{\min} 和 x_{\max} 分别表示第 i 综合指标及第 i 综合指标的最小值和最大值。

抗旱系数(DC) 在一定程度上反映了油莎豆种质资源在干旱胁迫条件下的变化程度。综合抗旱系数(CDC) 和抗旱性度量值(D) 反映了油莎豆种质的抗旱能力, 数值越大, 抗旱性越强。

2 结果与分析

2.1 种质资源代表性及其抗旱指标测定值分析

CK 处理下 39 份油莎豆种质资源的变异系数介于 0.070~0.880, 变化范围较广, 说明试验中选用的油莎豆种质材料基因型丰富, 代表性较好, 能够满足试验要求(表 2)。干旱胁迫下, 不同种质材料间的变异系数介于 0.148~0.584, 表明不同油莎豆种质对干旱胁迫的响应程度不同, 存在较大变异。与 CK 处理相比, T 处理显著影响油莎豆的表型和生理性状, 其中叶宽、叶厚和根长达差异显著水平($P < 0.05$), 株高、分蘖数、地上干重、地下干重和总干重达差异极显著水平($P < 0.01$), 说明干旱胁迫处理的试验效果较好, 选用的生物性状指标响应敏感。此外, 在 CK 和 T 两种处理条件下, 油莎豆种质生物性状指标的相关系数介于 0.035~0.673, 进一步表明各测定指标对干旱胁迫的敏感程度存在差异, 直接采用各性状指标的测定值很难准确反映 39 份油莎豆种质资源的抗旱性(表 2)。

2.2 抗旱系数与相关性分析

由表 3(见 17 页)可见, 同一指标的 DC 值在 39 份油莎豆种质资源间存在明显差异, 变异系数介于 0.123~0.728。同一种质在 17 个生物性状指标间的 DC 值变化较大, 说明各个指标的响应程度不同。

抗旱系数相关性分析结果表明(表 4, 见 18 页), 各指标间存在一定的相关性。其中叶绿素与叶宽、茎粗呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.416 和 0.431; 叶绿素与地上鲜重、总鲜重、组织含水量呈显著正相关关系, 相关系数分别为 0.369、0.366、0.351; 叶宽与叶厚、茎粗、组织含水量呈极显著正相关关系, 相关系数分别为 0.469、0.678、0.431; 叶宽与根长、地上鲜重、总鲜重呈显著正相关关系, 相关系数分别为 0.334、0.405、0.365; 叶厚与茎粗呈极显著正相关关系, 相关系数为 0.469, 与枯黄绿呈极显著负相关关系, 相关系数为 -0.472, 与分蘖数、地上鲜重、组织含水量呈显著正相关关系, 相关系数分别为 0.317、0.360、0.349; 茎粗与根长、组织含水量呈极显著正相关关系, 相关系数分别为 0.515 和 0.531; 茎粗与地上鲜重、总鲜重呈显著正相关关系, 相关系数分别为 0.358 和 0.320; 分蘖数与枯黄绿呈显著负相关关系, 相关系数为 -0.403; 地上鲜重与总鲜重、组织含水量呈极显著正相关关系, 相关系数分别为 0.991 和 0.672, 与地下鲜重呈显著正相关关系, 相关系数为 0.382; 地下鲜重与地下干重、总鲜重、鲜重根冠比呈极显著正相关关系, 相关系数分

别为 0.489、0.462、0.603, 与干重根冠比呈显著正相关关系, 相关系数为 0.384; 地上干重与总干重呈极显著正相关关系, 相关系数为 0.933, 与干重根冠比呈极显著负相关关系, 相关系数为 -0.509, 与地下干重呈显著正相关关系, 相关系数为 0.405; 地下干重与总干重、鲜重根冠比呈极显著正相关关系, 相关系数分别为 0.567、0.471, 与干重根冠比呈显著正相关关系, 相关系数为 0.333; 总鲜重与组织含水量呈显著正相关关系, 相关系数为 0.657; 总干重与干重根冠比呈显著负相关关系, 相关系数为 -0.390; 根冠比鲜重与根冠比干重呈显著正相关关系, 相关系数为 0.589。

由此可见, 抗旱系数在不同指标间存在相互关联和信息叠加, 很难客观准确地反映油莎豆种质资源的抗旱性。

2.3 主成分分析

对油莎豆各性状指标的 DC 值进行主成分分析, 进而获得因子载荷、特征根和贡献率(表 5, 见 19 页)。各因子特征值中前 5 个因子的累计贡献率达到 74.174%, 且其特征根大于 1。这 5 个因子涵盖原始数据中的大部分信息, 可作为油莎豆干旱胁迫的有效成分。在此基础上, 提取前 5 个因子, 将原 17 个指标转换为 5 个相互独立的抗旱性综合指标(以 F1、F2、F3、F4 和 F5 表示)。由表 5 可见, F1 在叶宽、地上鲜重、总鲜重上有较高载荷。F2 在地下鲜重、地下干重、鲜重根冠比上有较高载荷, F3 在地上干重、总干重、干重根冠比上有较高载荷, F4 在根长上有较高载荷, F5 在枯叶率上有较高载荷。综合而言, 叶宽、枯叶率、根长、鲜重、干重、根冠比可以作为油莎豆种质资源抗旱评价主要指标。

2.4 油莎豆种质资源的综合抗旱性评价

39 份油莎豆种质资源的 CDC 值介于 0.570~1.184, 平均值为 0.925, 变异系数为 0.137。依据 CDC 值进行排序, 结果表明油莎豆种质资源 JYD-1、JYD-14、JYD-39、JYD-21、JYD-34 和 JYD-28 的抗旱性较强, JYD-17、JYD-10 和 JYD-35 的抗旱性较弱, 其余种质介于两者之间。此外, 39 份油莎豆种质资源的 D 值介于 0.765~3.352, 平均值为 1.730, 变异系数为 0.347。 D 值排序结果表明, 油莎豆种质资源 JYD-39、JYD-34、JYD-3、JYD-28、JYD-4 和 JYD-7 的抗旱性较强, JYD-17、JYD-8 和 JYD-19 的抗旱性较弱, 其余种质介于两者之间。 CDC 值和 D 值的抗旱评价结果基本吻合。综合二者排序结果可知, 抗旱性强的油莎豆种质资源为源 JYD-39、JYD-34 和 JYD-28, 抗旱性弱的材料为 JYD-17。

表2 干旱胁迫和正常浇水条件下供试油莎豆各指标值差异数分析

Table 2 Difference analysis of the mean value of each index of Tigernut accessions under drought stress and irrigation conditions

处理 Treatment	参数 Parameter	根冠比鲜重 Root-shoot ratio at fresh weight										根冠比干重 Root-shoot ratio at dry weight									
		株高 Plant height /cm	叶宽 Leaf width /mm	叶厚 Leaf thickness /mm	叶绿素 Chlorophyll /SPAD	茎粗 Stem diameter /mm	分蘖数 Number of tillers	枯叶率 Withering rate	根长 Root length /cm	地上鲜重 Ground fresh weight/g	地下鲜重 Underground fresh weight/g	地上干重 Ground dry weight /g	地下干重 Underground dry weight /g	总鲜重 Total fresh weight/g	总干重 Total dry weight/g	组织含水量 Tissue water content/%	组织含水 量 Tissue water content/%	根冠比 Root-shoot ratio at fresh weight	根冠比 Root-shoot ratio at dry weight		
CK	最大值 Max.	66.350	47.700	6.315	0.393	4.998	6.000	0.398	23.000	11.255	2.181	1.503	0.370	13.435	1.873	94.155	0.343	1.826			
	最小值 Min.	36.450	35.200	3.208	0.150	2.803	1.250	0.127	10.850	1.701	0.289	0.230	0.056	1.870	0.328	62.221	0.116	0.106			
	均值 Average	52.284	40.821	4.775	0.228	3.796	2.833	0.254	17.365	6.135	1.173	0.842	0.175	7.270	1.002	85.355	0.195	0.337			
	标准差 SD	6.820	3.262	0.789	0.045	0.541	1.169	0.073	3.037	1.874	0.431	0.292	0.069	2.223	0.342	5.960	0.050	0.296			
	变异系数 Coefficient of variation	0.130	0.080	0.165	0.199	0.143	0.413	0.288	0.175	0.305	0.368	0.347	0.397	0.306	0.341	0.070	0.259	0.880			
	最大值 Max.	62.350	39.175	4.945	0.218	3.813	4.500	1.000	20.650	2.269	0.939	1.032	0.367	2.644	1.275	71.342	0.285	0.387			
T	最小值 Min.	32.450	14.900	1.963	0.083	1.738	1.750	0.445	6.750	0.713	0.046	0.228	0.028	0.758	0.256	30.928	0.067	0.125			
	均值 Average	48.678	30.662	3.674	0.153	2.745	2.417	0.920	16.139	1.547	0.259	0.664	0.155	1.787	0.819	53.522	0.157	0.229			
	标准差 SD	7.198	6.067	0.767	0.034	0.457	0.624	0.148	2.873	0.338	0.152	0.177	0.064	0.392	0.233	10.896	0.060	0.056			
	变异系数 Coefficient of variation	0.148	0.198	0.209	0.222	0.167	0.258	0.161	0.178	0.218	0.584	0.267	0.414	0.219	0.284	0.204	0.379	0.245			
	t 值 t value	3.965	10.136	7.912	6.931	10.867	2.754	-24.418	2.227	15.217	12.939	4.587	1.649	15.530	4.041	14.604	3.100	2.191			
	P 值 P value	0.000 **	0.201	0.018 *	0.012 *	0.088	0.000 **	0.558	0.044 *	0.696	0.495	0.000 **	0.005 **	0.415	0.000 **	0.142	0.832	0.461			
r	相关系数 Coefficient of variation	0.673	0.209	0.376	-0.399	0.277	0.592	-0.097	0.324	0.065	0.113	0.551	0.444	0.134	0.575	-0.239	0.035	-0.122			
	r																				

注: * 表示在 $P<0.05$ 水平差异显著。** 表示在 $P<0.01$ 水平差异极显著。下同。Note: * : significantly different at $P<0.05$. ** : significantly different at $P<0.01$. The same below.

表3 供试油莎豆种质各指标的抗旱系数

Table 3 Drought resistance coefficient of each index of tested germplasm

种质编号 Number	株高 Plant height	叶绿素 Chlorophyll content	叶宽 Leaf width	叶厚 Leaf thickness	茎粗 Stem diameter	分蘖数 Number of tillers	枯叶率 Withering rate	根长 Root length	地上鲜重 Ground fresh weight			地下鲜重 Underground fresh weight			总鲜重 Total fresh weight			总干重 Total dry weight			组织含水量 Tissue water content			根冠比鲜重 Root-shoot ratio at fresh weight		
									地上干重 Ground dry weight	地下干重 Underground dry weight	总鲜重 Total fresh weight	地上干重 Ground dry weight	地下干重 Underground dry weight	总鲜重 Total fresh weight	地上干重 Ground dry weight	地下干重 Underground dry weight	总鲜重 Total fresh weight	地上干重 Ground dry weight	地下干重 Underground dry weight	总鲜重 Total fresh weight	地上干重 Ground dry weight	地下干重 Underground dry weight	总鲜重 Total fresh weight	地上干重 Ground dry weight	地下干重 Underground dry weight	总鲜重 Total fresh weight
JYD-1	0.977	0.757	0.805	0.398	0.650	0.700	7.516	0.875	0.181	0.318	0.731	1.389	0.200	0.847	0.443	1.697	0.591	0.668	0.296	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865
JYD-2	0.945	0.769	0.662	0.550	0.734	1.000	2.614	1.015	0.220	0.144	1.826	0.976	0.205	1.577	0.591	0.668	0.296	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865		
JYD-3	0.807	0.597	0.615	0.398	0.616	0.500	6.494	0.582	0.254	0.228	1.361	1.707	0.249	1.874	0.660	0.660	0.205	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865		
JYD-4	0.837	0.563	0.414	0.396	0.427	0.778	4.287	0.700	0.139	0.178	0.579	1.094	0.145	0.660	0.510	0.510	0.205	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865		
JYD-5	0.959	0.694	0.661	0.490	0.646	0.500	6.882	1.041	0.219	0.214	0.785	1.296	0.218	0.869	0.638	0.638	0.218	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865		
JYD-6	0.965	0.686	0.647	0.287	0.524	1.333	5.192	1.000	0.187	0.192	0.924	1.213	0.188	0.951	0.366	0.366	0.218	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865		
JYD-7	0.849	0.548	0.614	0.311	0.570	0.609	7.807	0.830	0.164	0.090	0.469	0.412	0.169	0.460	0.634	0.634	0.218	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865		
JYD-8	1.098	0.714	0.537	0.663	0.673	1.100	3.076	1.019	0.253	0.203	0.882	0.964	0.246	0.894	0.538	0.538	0.203	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865		
JYD-9	0.827	0.715	0.667	0.772	0.736	0.889	5.091	1.075	0.176	0.190	0.602	0.747	0.178	0.628	0.610	0.610	0.205	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865		
JYD-10	0.960	0.812	0.595	0.757	0.570	0.700	3.057	0.784	0.143	0.119	0.551	0.454	0.139	0.532	0.543	0.543	0.205	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865		
JYD-11	0.884	0.419	0.634	0.913	0.546	0.846	3.656	0.877	0.115	0.155	0.854	1.186	0.117	1.139	0.328	0.328	0.205	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865		
JYD-12	0.962	0.926	0.805	0.625	0.551	1.125	3.992	1.030	0.248	0.302	1.217	1.428	0.256	1.258	0.444	0.444	0.205	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865		
JYD-13	0.927	1.050	0.567	0.531	0.813	0.542	7.864	0.988	0.209	0.361	0.767	0.615	0.230	0.735	0.634	0.634	0.205	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865		
JYD-14	0.449	0.552	0.854	0.689	1.000	3.578	0.924	0.215	0.239	0.996	1.231	0.219	1.038	0.426	0.426	0.205	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865			
JYD-15	1.003	0.449	0.552	0.854	0.689	1.000	3.201	1.333	0.194	0.206	0.710	0.887	0.196	0.736	0.398	0.398	0.205	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865		
JYD-16	1.173	0.646	0.804	0.420	0.750	0.923	0.831	0.800	0.260	0.125	0.577	0.735	0.187	0.591	0.562	0.562	0.205	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865		
JYD-17	0.932	0.655	1.057	0.701	0.831	0.800	2.686	0.864	0.200	0.125	0.510	0.875	0.259	0.857	0.608	0.608	0.205	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865		
JYD-18	0.775	0.662	0.855	0.684	0.734	0.889	3.711	1.170	0.189	0.092	0.989	1.022	0.165	0.523	0.652	0.652	0.205	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865		
JYD-19	0.921	0.810	0.847	0.926	0.634	1.375	3.406	0.791	0.236	0.148	1.043	0.961	0.223	1.030	0.439	0.439	0.205	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865		
JYD-20	1.081	0.709	1.024	0.812	0.911	0.737	3.393	1.290	0.457	0.250	0.900	1.136	0.428	0.933	0.539	0.539	0.205	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865		
JYD-21	0.901	0.650	0.958	0.667	0.947	0.889	7.193	1.208	0.284	0.195	0.516	0.854	0.284	0.552	0.281	0.281	0.205	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865		
JYD-22	0.901	0.667	0.688	0.436	0.768	0.667	4.776	0.865	0.262	0.235	0.875	0.785	0.259	0.857	0.608	0.608	0.205	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865		
JYD-23	0.871	0.972	0.896	0.565	0.716	1.000	2.538	1.121	0.241	0.206	0.651	0.934	0.236	0.688	0.673	0.673	0.205	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865		
JYD-24	1.172	0.789	0.903	0.750	0.785	0.778	1.839	1.094	0.290	0.148	0.555	0.733	0.274	0.580	0.795	0.516	0.205	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865		
JYD-25	0.896	0.900	0.730	0.548	0.792	1.125	5.437	0.821	0.245	0.152	0.706	0.958	0.229	0.685	0.539	0.539	0.205	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865		
JYD-26	0.990	0.831	0.921	0.661	0.638	1.333	2.937	0.685	0.322	0.134	0.886	0.522	0.281	0.798	0.703	0.703	0.205	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865		
JYD-27	1.111	0.873	0.985	0.943	0.797	0.529	2.043	1.144	0.415	0.165	0.510	0.924	0.382	0.516	0.868	0.688	0.688	0.205	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865	
JYD-28	0.892	0.951	0.890	0.596	0.818	1.000	2.570	0.991	0.308	0.385	0.865	1.587	0.247	0.857	0.669	0.669	0.205	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865		
JYD-29	0.919	0.743	0.933	0.892	0.885	1.385	2.979	0.796	0.389	0.236	1.377	0.889	0.366	1.576	0.692	0.692	0.205	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865		
JYD-30	0.767	0.749	0.683	0.753	0.800	3.529	0.979	0.245	0.178	0.492	0.651	0.236	0.658	0.712	0.685	0.685	0.205	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865		
JYD-31	0.849	0.841	0.984	0.953	0.843	0.667	1.816	0.693	0.275	0.158	0.791	0.480	0.256	0.823	0.703	0.703	0.205	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865		
JYD-32	0.716	0.841	0.886	0.750	0.804	3.465	0.985	0.352	0.334	0.752	1.021	0.350	0.806	0.740	0.740	0.205	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865			
JYD-33	0.716	0.841	0.886	0.750	0.804	1.000	4.108	0.824	0.217	0.121	0.814	1.152	0.204	0.849	0.660	0.660	0.205	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865		
JYD-34	1.014	1.103	0.982	0.895	1.089	0.909	3.696	1.724	0.458	0.273	1.408	1.419	0.497	1.334	0.663	0.663	0.205	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865		
JYD-35	0.841	0.505	0.592	0.663	0.609	1.077	1.787	0.586	0.194	0.045	0.684	0.205	0.162	0.543	0.703	0.703	0.205	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865		
JYD-36	0.891	0.818	0.759	0.762	0.773	1.000	4.105	0.704	0.226	0.124	0.973	0.747	0.203	0.916	0.581	0.581	0.205	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865		
JYD-37	0.983	0.843	0.844	0.844	0.861	1.000	4.397	0.947	0.938	0.684	1.184	0.959	1.182	0.959	1.182	0.959	0.959	0.205	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865	
JYD-38	1.243	0.877	1.001	1.450	0.894	1.100	4.108	0.824	0.217	0.121	0.814	1.152	0.204	0.849	0.660	0.660	0.205	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865		
JYD-39	0.794	0.803	0.799	0.909	0.872	1.000	3.708	1.013	0.455	0.441	0.638	1.173	0.453	0.740	0.835	0.835	0.205	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865		
JYD-40	0.907	0.856	0.849	0.756	0.800	2.932	0.787	0.462	0.392	1.195	1.088	0.451	1.173	0.453	0.740	0.835	0.835	0.205	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865	
JYD-41	0.958	0.892	0.750	1.053	0.780	2.000	2.042	0.917	0.479	0.271	0.763	0.927	0.446	0.740	0.835	0.835	0.205	1.642	0.574	0.876	0.574	0.510	1.283	1.865		
JYD-42	0.744																									

表 4 供试油莎草和质各指标抗旱系数相关性
Table 4 Correlation of the drought resistance coefficient of each index of tigernut accessions

指标 Index	株高 Plant height	叶绿素 Chlorophyll	叶宽 Leaf width	叶厚 Leaf thickness	茎粗 Stem diameter	分蘖数 Number of tillers	枯叶率 Withering rate	根长 Root length	地上鲜重 Ground fresh weight	地下鲜重 Underground fresh weight	总鲜重 Total fresh weight	组织含 水量 Tissue water content	根冠比鲜重 Root shoot ratio at fresh weight
叶绿素 Chlorophyll	0.252												
叶宽 Leaf width	0.268	0.416 **											
叶厚 Leaf thickness	0.250	0.225	0.469 **										
茎粗 Stem diameter	0.179	0.431 **	0.678 **	0.469 **									
分蘖数 Number of tillers	0.024	0.090	0.097	0.317 *	0.008								
枯叶率 Withering rate	-0.178	-0.074	-0.297	-0.472 **	-0.130	-0.403 *							
根长 Root length	0.306	0.291	0.334 *	0.037	0.515 **	-0.071	-0.036						
地上鲜重 Ground fresh weight	0.114	0.369 *	0.405 *	0.360 *	0.358 *	0.208	-0.204	0.217					
地下鲜重 Underground fresh weight	-0.098	0.091	0.028	0.097	0.011	-0.003	-0.006	0.101	0.382 *				
地上干重 Ground dry weight	0.052	0.100	0.003	0.089	0.027	0.194	-0.092	0.037	0.236	0.163			
地下干重 Underground dry weight	0.141	0.088	0.079	-0.002	0.035	-0.013	0.142	0.253	0.258	0.489 **	0.405 *		
总鲜重 Total fresh weight	0.095	0.366 *	0.365 *	0.304	0.320 *	0.170	-0.152	0.210	0.991 **	0.462 **	0.206	0.305	
总干重 Total dry weight	0.000	0.050	-0.012	0.044	0.006	0.121	0.015	-0.039	0.239	0.198	0.933 **	0.567 **	0.225
组织含水量 Tissue water content	-0.034	0.351 *	0.431 **	0.349 *	0.531 **	0.051	-0.213	0.118	0.672 **	0.136	-0.248	-0.095	0.657 **
根冠比鲜重 Root-shoot ratio at fresh weight	0.118	-0.236	-0.311	-0.169	-0.148	0.266	-0.001	-0.178	0.603 **	-0.091	0.471 **	-0.064	0.002
根冠比干重 Root-shoot ratio at dry weight	0.015	0.031	-0.250	-0.002	-0.185	0.036	0.272	0.075	0.384 *	-0.509 **	0.156	-0.390 *	0.219

表5 供试油莎豆种质各指标主成分向量特征及贡献率

Table 5 The eigenvector and contribution rate of the main components for each index of Tigernut accessions

指标 Index	因子载荷 Factor loading				
	F1	F2	F3	F4	F5
株高 Plant height	0.301	-0.157	-0.090	0.534	0.314
叶绿素 Chlorophyll	0.569	0.025	0.111	0.272	-0.041
叶宽 Leaf width	0.707	-0.247	0.132	0.267	0.052
叶厚 Leaf thickness	0.611	-0.358	-0.153	-0.095	0.315
茎粗 Stem diameter	0.693	-0.215	0.180	0.377	-0.138
分蘖数 Number of tillers	0.266	-0.181	-0.326	-0.359	0.501
枯叶率 Withering rate	-0.382	0.356	0.128	0.240	-0.601
根长 Root length	0.425	0.117	0.238	0.609	0.038
地上鲜重 Ground fresh weight	0.848	0.154	-0.018	-0.328	-0.243
地下鲜重 Underground fresh weight	0.321	0.721	0.126	-0.261	0.195
地上干重 Ground dry weight	0.244	0.310	-0.869	0.098	-0.092
地下干重 Underground dry weight	0.279	0.786	-0.175	0.206	0.146
总鲜重 Total fresh weight	0.818	0.252	0.039	-0.340	-0.234
总干重 Total dry weight	0.218	0.440	-0.819	0.074	-0.141
组织含水量 Tissue water content	0.682	-0.187	0.418	-0.331	-0.282
根冠比鲜重 Root-shoot ratio at fresh weight	-0.180	0.775	0.328	0.042	0.288
根冠比干重 Root-shoot ratio at dry weight	0.039	0.474	0.762	-0.058	0.216
特征根 Characteristic root	4.341	2.809	2.611	1.604	1.245
贡献率/% Contribution rate	25.534	16.525	15.360	9.433	7.322
累计贡献率/% Cumulative contribution rate	25.534	42.059	57.419	66.852	74.174
因子权重 Factor weight	0.344	0.223	0.207	0.127	0.099

2.5 聚类分析及抗旱级别划分

采用欧式平方根距离对油莎豆种质资源 D 值进行聚类分析,结果如图 1 所示,在 $\lambda=5$ 处将 39 份油莎豆种质资源分为 4 类。其中第 1 类为抗旱材料,包括 JYD-39 和 JYD-34 两份种质,占总数的 5.13%,这两份材料的 CDC 值和 D 值也较高(表 6),

与前述抗旱综合鉴定结果相一致;第 2 类为中度抗旱材料,包括 10 份种质,占总数的 25.64%;第 3 类为中度敏感材料,包括 16 份种质,占总数的 41.03%;第 4 类为敏感材料,包括 11 份种质,占总数的 28.21%。

3 讨论

3.1 油莎豆种质资源抗旱鉴定及抗旱指标筛选

植物的抗旱能力与其所处的发育阶段有关并受多种内在机制调控^[20-21]。因此,单凭一种指标来进行抗旱评价是不准确的,此外过多指标虽然可以更全面考量其综合性,但过多的数据导致工作量大,耗时费力。因此选择合理的抗旱指标是抗旱性鉴定的关键,在省时省力的基础上,较为全面的评价其综合抗旱性。

不同作物抗旱指标不同,相关性状的鉴定角度的不同也会影响作物抗旱值。通过形态学指标、产量指标以及生理生化指标间接评价和鉴定植物的抗旱性具有简单、快速和准确的特点,因此被广泛采用^[22-24]。王园园等^[25]通过隶属函数和方差分析对 5 个紫花苜蓿种质资源进行综合性抗旱评价,认为在形态指标中茎粗、株高、根长、分枝数、叶片数、根瘤数这 6 项指标可作为苜蓿抗旱适宜性评价的特征指标。白旭瑞^[10]采用隶属函数、主成分分析、相关性分析和聚类分析的方法,测定了 190 份小麦材料,分析得到在干旱胁迫条件下,株高、最大根长、鲜重根冠比、干重根冠比、苗失水率、根失水率、总根体积、总根长、平均根系直径和根系表面积 10 个抗旱指标。易津等^[26]研究发现,在干旱条件下,赖草属(*Leymus*)牧草表现出的抗旱能力在不同品种间存在显著差异,其中种苗存活率、株高、根冠比、叶绿素含量可以作为鉴定赖草属牧草品种之间抗旱能力强弱的指标。本研究通过选取株高、叶宽、叶厚、茎粗、分蘖数、枯叶率、根长、地上鲜重、地上干重、地下鲜重、地下干重、总鲜重、总干重、组织含水量、根冠比鲜重、根冠比干重以及叶绿素等 17 个性状指标进行油莎豆抗旱性评价,表明在干旱胁迫条件下,所有油莎豆种质都会呈现显著受害现象,但受害程度在不同种质资源间存在较大变异,这与前人对其他农作物的研究结果相一致。但是主成分分析结果表明,叶宽、枯叶率、根长、鲜重、干重和根冠比可以作为油莎豆种质资源苗期抗旱评价主要指标,这与小麦、花生、大豆的相关研究结果存在一定差异,说明不同作物对干旱胁迫呈现出一定的种属特异性。

表 6 供试油莎豆种质抗旱性评价的 CDC 值和 D 值Table 6 The CDC and D values of drought resistance evaluation of Tigernut accessions

种质编号 Number	隶属函数 Membership function						CDC		D	
	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5	μ_6	数值 Value	排序 Sort	数值 Value	排序 Sort
JYD-1	2.496	3.258	1.760	1.823	0.538	2.496	1.184	1	2.235	9
JYD-2	0.303	1.340	4.256	1.247	0.180	0.303	0.870	27	1.461	24
JYD-3	2.320	3.538	3.747	0.307	2.844	2.320	1.066	8	2.682	3
JYD-4	4.499	0.954	1.759	1.894	1.179	4.499	0.874	25	2.483	5
JYD-5	2.052	1.568	1.272	1.533	1.746	2.052	1.074	7	1.686	18
JYD-6	2.879	1.486	1.666	0.857	1.210	2.879	0.965	12	1.895	13
JYD-7	4.262	1.189	1.863	0.060	2.757	4.262	0.933	17	2.397	6
JYD-8	1.318	0.378	1.042	0.802	1.649	1.318	0.864	30	1.019	38
JYD-9	1.831	1.211	1.775	0.576	0.469	1.831	0.945	16	1.387	28
JYD-10	2.855	2.052	1.047	0.216	1.033	2.855	0.720	38	1.786	16
JYD-12	2.581	2.517	2.456	1.284	2.276	2.581	0.902	22	2.346	7
JYD-13	0.624	2.010	1.903	1.246	1.748	0.624	1.039	9	1.388	27
JYD-14	1.543	0.898	1.916	1.715	2.044	1.543	1.135	2	1.548	21
JYD-15	1.954	0.999	1.753	0.477	1.842	1.954	0.911	20	1.500	23
JYD-16	1.437	0.117	1.100	2.786	1.957	1.437	0.868	28	1.296	29
JYD-17	0.051	2.198	1.480	1.021	1.003	0.051	0.776	37	1.043	37
JYD-18	1.696	1.485	1.268	0.966	1.062	1.696	0.805	34	1.405	26
JYD-19	0.139	0.036	2.483	0.179	1.748	0.139	0.884	24	0.765	39
JYD-20	3.293	0.383	1.052	1.710	0.066	3.293	0.971	11	1.661	19
JYD-21	1.012	1.269	2.755	1.446	1.936	1.012	1.105	4	1.577	20
JYD-22	1.715	0.622	0.664	0.504	1.552	1.715	0.906	21	1.084	34
JYD-23	0.809	1.142	2.009	0.840	1.200	0.809	0.864	29	1.174	32
JYD-24	1.490	2.243	2.078	1.399	1.321	1.490	0.782	36	1.751	17
JYD-25	1.256	1.397	0.632	0.371	1.392	1.256	0.917	19	1.059	35
JYD-26	0.653	1.945	1.278	1.590	0.790	0.653	0.802	35	1.203	30
JYD-27	2.796	1.960	2.417	1.238	0.452	2.796	0.808	33	2.102	11
JYD-28	2.623	1.955	4.036	1.343	2.649	2.623	1.084	6	2.607	4
JYD-29	2.559	0.535	3.285	1.202	0.449	2.559	0.951	15	1.878	15
JYD-30	1.311	1.518	2.132	1.385	0.133	1.311	0.836	31	1.421	25
JYD-31	0.997	2.159	0.819	0.064	1.162	0.997	0.816	32	1.117	33
JYD-33	1.071	0.768	1.894	1.750	0.467	1.071	0.960	13	1.201	31
JYD-34	4.954	1.560	1.746	3.741	1.199	4.954	1.092	5	3.009	2
JYD-35	2.989	2.774	1.080	2.860	0.498	2.989	0.570	39	2.283	8
JYD-36	1.207	1.263	1.429	0.265	0.202	1.207	0.871	26	1.047	36
JYD-39	5.802	2.986	0.001	3.524	2.444	5.802	1.131	3	3.352	1
JYD-40	2.415	2.185	1.751	2.245	1.930	2.415	0.954	14	2.157	10
JYD-41	2.612	0.750	2.563	1.892	0.507	2.612	1.023	10	1.888	14
JYD-42	2.474	1.283	1.826	0.002	0.218	2.474	0.929	18	1.538	22
JYD-45	3.061	1.543	0.128	3.214	2.011	3.061	0.898	23	2.031	12
平均数 Average							0.925		1.730	
变异系数 Coefficient of variation							0.137		0.347	

3.2 油莎豆抗旱性评价分析方法选取

由于植物的抗旱性受多个基因调控^[27]且是多个指标相互表达的结果,因此对植物抗旱性的评价不仅与评价指标的选择密切相关,还需要运用准确恰当的分析方法。已有研究采用多种方法对小麦^[28]、水稻^[29]等种质资源的抗旱性进行了评价,其中,抗旱性度量值(D)可作为抗旱性评价的优良指标。许爱云等^[30]采用隶属函数和主成分分析法对12份草本植物资源开展抗旱鉴定。汪灿等^[31-32]在萌发期和成熟期通过隶属函数值、 CDC 值和 D 值对

50份薏苡种质进行抗旱性评价,并筛选出3份抗旱性强的薏苡种质。本研究在前人研究基础上,采用隶属函数与主成分分析相结合的分析方法求得 D 值,进而筛选出3份抗旱性强的油莎豆种质资源。

3.3 油莎豆抗旱综合评价

干旱胁迫下,油莎豆在表型和生理性状均会受到影响,通过多个指标综合评价,能够避免单项指标所带来的局限性,可以正确客观地反映油莎豆种质的抗旱能力。本研究采用主成分分析法,将17项指标转换为5个相互独立的指标。运用综合抗旱系

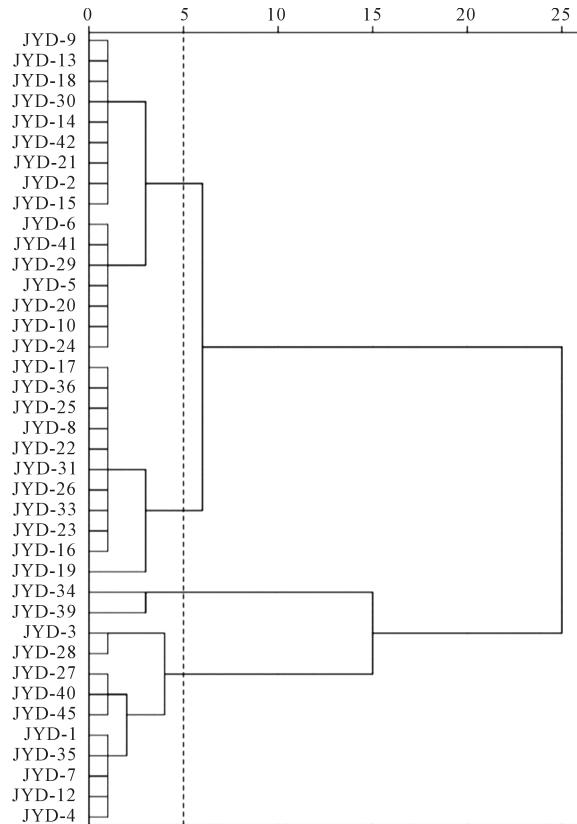


图1 基于D值的油莎豆种质抗旱性系统聚类图

Fig.1 Clustering analysis of drought resistance coefficient of 39 Tigernut accessions based on D values

数法的同时,采用隶属函数法将其转换成相互独立的综合指标,结合单项抗旱系数、相关分析、主成分分析、聚类分析,对39份油莎豆品种的抗旱性进行综合评价。由于D值是一个无量纲数值,消除了各项指标的单位的影响。以D值为综合指标的评价方法不仅考虑了各个指标间的相互关系,同时考虑了各指标的重要性,能使评价结果更为准确可靠。

4 结 论

干旱胁迫显著影响油莎豆苗期的表型和生理变化。D值为油莎豆抗旱评价的适宜指标。叶宽、枯叶率、根长、鲜重、干重和根冠比可作为油莎豆苗期抗旱鉴定的主要指标。筛选出苗期抗旱性强的油莎豆种质为JYD-39、JYD-34和JYD-28。

参 考 文 献:

- [1] 阳振乐.油莎豆的特性及其研究进展[J].北方园艺,2017,(17):192-201.
YANG Z L. Characteristics and research progress of *Cyperus esculentus* [J]. Northern Horticulture, 2017, (17): 192-201.
- [2] 路战远,刘和,张建中,等.油莎豆产业发展现状、问题与建议[J].现代农业,2019,(6):11,13.
LU Z Y, LIU H, ZHANG J Z, et al. Current situation, problems and suggestions of oil sha bean industry development [J]. Modern Agriculture, 2019, (6): 11, 13.
- [3] LIU D T, JI H Y, YANG Z L. Functional characterization of three novel genes encoding diacylglycerol acyltransferase (DGAT) from oil-rich tubers of *Cyperus esculentus* [J]. Plant and Cell Physiology, 2020, 61(1): 118-129.
- [4] GAO Y, SUN Y, GAO H L, et al. Correction to: ectopic overexpression of a type-II DGAT (CeDGAT2-2) derived from oil-rich tuber of *Cyperus esculentus* enhances accumulation of oil and oleic acid in tobacco leaves [J]. Biotechnology for Biofuels, 2021, 14(1): 139.
- [5] 刘亚兰,赵月,徐梦琦,等.极端干旱区种植行距对油莎豆生长及土壤特性的影响[J].草地学报,2021,29(11):2486-2493.
LIU Y L, ZHAO Y, XU M Q, et al. Effect of row spacing on the growth of *Cyperus esculentus* and soil properties in extremely arid region [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(11): 2486-2493.
- [6] 侯智惠,慕宗杰,赵俊利,等.北方风沙区油莎豆防风固沙“三生共赢”技术模式评价指标体系构建研究[J].北方农业学报,2021,49(4):127-134.
HOU Z H, MU Z J, ZHAO J L, et al. Construction of evaluation index system for the windbreak and sand-fixing technology model of *Cyperus esculentus* guided by ecology, life and production integration concepts in windy and sandy areas in northern China [J]. Journal of Northern Agriculture, 2021, 49(4): 127-134.
- [7] 王兴荣,李明,张彦军,等.青稞种质资源成株期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J].作物学报,2022,48(5):1279-1287.
WANG X R, LI Y, ZHANG Y J, et al. Drought resistance identification and drought resistance indexes screening of Tibetan hulless barley resources at adult stage [J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(5): 1279-1287.
- [8] 路贵和,戴景瑞,张书奎,等.不同干旱胁迫条件下我国玉米骨干自交系的抗旱性比较研究[J].作物学报,2005,(10):1284-1288.
LU G H, DAI J R, ZHANG S K, et al. Drought resistance of elite inbred lines in different water stress conditions [J]. Acta Agronomica Sinica, 2005, (10): 1284-1288.
- [9] 张会丽,许兴,朱林.利用隶属函数值法对玉米成熟期抗旱性的综合评价[J].玉米科学,2017,25(4):32-39.
ZHANG H L, XU X, ZHU L. Comprehensive evaluation on drought-resistance of maize in mature stage by subordinate function values analysis [J]. Journal of Maize Sciences, 2017, 25(4): 32-39.
- [10] 白旭瑞.小麦苗期抗旱性鉴定及抗旱品种筛选[D].保定:河北农业大学,2021.
BAI X R. Identification of drought resistance of wheat at seedling stage and selection of drought resistant varieties [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2021.
- [11] 任毅,颜安,张芳,等.国内外301份小麦品种(系)种子萌发期抗旱性鉴定及评价[J].干旱地区农业研究,2019,37(3):1-14.
REN Y, YAN A, ZHANG F, et al. Identification and evaluation of drought tolerance of 301 wheat varieties (lines) at germination stage [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(3): 1-14.
- [12] 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.
WANG X R, LIU Z X, ZHANG Y J, et al. Evaluation on drought resistance of soybean germplasm resources at multiple growth periods

- [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2021, 22(6): 1582-1594.
- [13] 李海明, 刘绍东, 张思平, 等. 陆地棉种质资源花铃期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J]. 植物遗传资源学报, 2019, 20(3): 583-597.
- LI H M, LIU S D, ZHANG S P, et al. Identification and indices screening of drought tolerance at flowering and boll setting stage in upland cotton germplasm resources[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2019, 20(3): 583-597.
- [14] 王兰芬, 武晶, 彭琳, 等. 绿豆种质资源抗旱性鉴定评价[J]. 植物遗传资源学报, 2019, 20(5): 1141-1150.
- WANG L F, WU J, PENG L, et al. Evaluation for drought-tolerance germplasm resource in mungbean [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2019, 20(5): 1141-1150.
- [15] 赵海明, 游永亮, 李源, 等. 紫花苜蓿资源抗旱性鉴定评价方法研究[J]. 草地学报, 2017, 25(6): 1308-1316.
- ZHAO H M, YOU Y L, LI Y, et al. Draught resistant identification and evaluation methods of alfalfa germplasm [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2017, 25(6): 1308-1316.
- [16] 武瑞鑫, 李源, 游永亮, 等. 紫花苜蓿全生育期抗旱性鉴定评价方法探讨[J]. 草地学报, 2020, 28(5): 1444-1453.
- WU R X, LI Y, YOU Y L, et al. Study on drought resistance identification and evaluation methods of alfalfa during whole growth period [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(5): 1444-1453.
- [17] 刘小慧, 王重丽, 王梦茹, 等. 圭亚那柱花草苗期抗旱性评价及抗旱种质鉴定[J]. 草地学报, 2020, 28(4): 956-967.
- LIU X H, WANG C L, WANG M R, et al. Evaluation on drought-resistance of stylosanthes guianensis and identification for drought-resistance germplasms in seedling stage [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(4): 956-967.
- [18] 李志勇, 王宗礼. 牧草种质资源描述规范和数据标准[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005.
- LI Z Y, WANG Z L. Descriptors and data standard for forage [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005.
- [19] 徐银萍, 潘永东, 刘强德, 等. 大麦种质资源成株期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J]. 作物学报, 2020, 46(3): 448-461.
- XU Y P, PAN Y D, LIU Q D, et al. Drought resistance identification and drought resistance indexes screening of barley resources at mature period [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(3): 448-461.
- [20] 张智猛, 万书波, 戴良香, 等. 花生抗旱性鉴定指标的筛选与评价[J]. 植物生态学报, 2011, 35(1): 100-109.
- ZHANG Z M, WAN S B, DAI L X, et al. Estimating and screening of drought resistance indexes of peanuts [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(1): 100-109.
- [21] DES MARAIS D L, MCKAY J K, RICHARDS J H, et al. Physiological genomics of response to soil drying in diverse *Arabidopsis* accessions[J]. *Plant Cell*, 2012, 24(3): 893-914.
- [22] 王利彬, 刘丽君, 裴宇峰, 等. 大豆种质资源芽期抗旱性鉴定[J]. 东北农业大学学报, 2012, 43(1): 36-43.
- WANG L B, LIU L J, PEI Y F, et al. Drought resistance identification of soybean germplasm resources at bud stage [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2012, 43(1): 36-43.
- [23] 颜振德, 朱崇文, 盛家廉. 甘薯品种的耐旱性及其鉴定方法的研究[J]. 作物学报, 1964, (2): 183-194.
- YAN Z D, ZHU C W, SHENG J L. Study on drought tolerance and identification methods of sweet potato varieties [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1964, (2): 183-194.
- [24] 袁志伟, 孙小妹. 作物抗旱性鉴定指标及评价方法研究进展[J]. 甘肃农业科技, 2012, (11): 36-39.
- YUAN Z W, SUN X M. The research summary of identification index of drought resistance and its evaluation method [J]. *Gansu Agricultural Science and Technology*, 2012, (11): 36-39.
- [25] 王园园, 赵明, 张红香, 等. 干旱胁迫对紫花苜蓿幼苗形态和生理特征的影响[J]. 中国草地学报, 2021, 43(9): 78-87.
- WANG Y Y, ZHAO M, ZHANG H X, et al. Effects of drought stress on morphological and physiological characteristics of alfalfa seedlings [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2021, 43(9): 78-87.
- [26] 易津, 谷安琳, 贾光宏, 等. 赖草属牧草幼苗耐旱性生理基础的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2001, (S1): 47-50.
- YI J, GU A L, JIA G H, et al. Studies on the drought hardiness in seedling of *Leymus hochst* [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2001, (S1): 47-50.
- [27] LIU T Y, YE N, WANG X, et al. Drought stress and plant ecotype drive microbiome recruitment in switchgrass rhizosphere [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2021, 63(10): 1753-1774.
- [28] 李国瑞, 李朝苏, 吴春, 等. 西南地区小麦品种萌发期抗旱性分析[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(4): 212-219.
- LI G R, LI C S, WU C, et al. The analysis of drought resistance in different wheat varieties during germination in southwest area of China [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(4): 212-219.
- [29] 田又升, 谢宗铭, 吴向东, 等. 水稻种质资源萌发期抗旱性综合鉴定[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(4): 173-180.
- TIAN Y S, XIE Z M, WU X D, et al. Identification of drought tolerance of rice germplasm during germination period [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33(4): 173-180.
- [30] 许爱云, 曹兵, 谢云. 干旱风沙区煤炭基地 12 种草本植物对干旱胁迫的生理生态响应及抗旱性评价[J]. 草业学报, 2020, 29(10): 22-34.
- XU A Y, CAO B, XIE Y. Physiological-ecological responses of twelve herbaceous plant species under drought stress and evaluation of their drought resistance when planted in coal producing basis in arid windy and sandy areas [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(10): 22-34.
- [31] 汪灿, 周凌波, 张国兵, 等. 蔷薇科种质资源萌发期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J]. 植物遗传资源学报, 2017, 18(5): 846-859.
- WANG C, ZHOU L B, ZHANG G B, et al. Identification and indices screening of drought resistance in job's tears germplasm resources at germination stage [J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2017, 18(5): 846-859.
- [32] 汪灿, 周凌波, 张国兵, 等. 蔷薇科种质资源成株期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J]. 作物学报, 2017, 43(9): 1381-1394.
- WANG C, ZHOU L B, ZHANG G B, et al. Identification and indices screening of drought resistance at adult plant stage in job's tears germplasm resources [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(9): 1381-1394.