



万泽华, 华之梦, 王敏, 等. 黑芝麻种质资源苗期耐渍性鉴定及评价[J]. 江西农业大学学报, 2024, 46(1): 13-24.

WAN Z H, HUA Z M, WANG M, et al. Identification and evaluation of waterlogging tolerance of black sesame germplasm resources at seedling stage[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2024, 46(1): 13-24.

黑芝麻种质资源苗期耐渍性鉴定及评价

万泽华¹, 华之梦², 王敏¹, Muhammad Talha Aslam¹,
沈庭海¹, 卢维娜¹, 何斌¹, 方圣^{1*}, 吴自明^{1*}

(1. 江西农业大学 作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室, 江西 南昌 330045; 2. 浙江省绍兴市农业科学研究院, 浙江 绍兴 312035)

摘要:【目的】渍害是影响黑芝麻生长的主要障碍因素之一, 鉴定黑芝麻种质资源苗期耐渍性, 确定可靠的评价指标, 为耐渍黑芝麻品种的选育和栽培提供理论依据。【方法】以 52 份黑芝麻种质资源为试验材料, 设置苗期渍水 7 d 处理, 测定存活率、株高和根长等 7 个苗期指标, 计算各指标的耐渍系数, 采用主成分分析、隶属函数分析、聚类分析、相关性分析和逐步回归分析, 将不同黑芝麻种质资源进行耐渍性综合评价及指标筛选。【结果】主成分分析法将 7 个指标简化为 4 个相互独立的综合指标, 能够包含全部信息的 79.25%; 利用隶属函数法计算耐渍性综合评价值, 并对其进行聚类分析, 将 52 份黑芝麻品种划分为三大类, 第一类为高度耐渍品种共 5 份, 第二类为中度耐渍品种共 39 份, 第三类为渍害敏感品种共 8 份。相关性分析表明株高、根长、地上部生物量和地下部生物量为综合评价值的主要影响因子, 且各指标间也有不同程度的相关性。利用回归分析法建立芝麻苗期耐渍性预测模型, 并从 7 个鉴定指标中筛选出株高、根长、地上部生物量和地下部生物量 4 个关键指标。【结论】都昌黑芝麻、鄱阳黑芝麻、多蒴黑芝麻、星子黑芝麻和 17-50 为高度耐渍品种。株高、根长、地上部生物量和地下部生物量可作为快速鉴定芝麻苗期的耐渍性的关键指标。

关键词: 黑芝麻; 苗期; 耐渍性; 主成分分析; 聚类分析; 综合评价

中图分类号: S565.3 文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1000-2286(2024)01-0013-12



Identification and evaluation of waterlogging tolerance of black sesame germplasm resources at seedling stage

WAN Zehua¹, HUA Zhimeng², WANG Min¹, Aslam Muhammad Talha¹,
SHEN Tinghai¹, LU Weina¹, HE Bing¹, FANG Sheng^{1*}, WU Ziming^{1*}

(1. Jiangxi Agricultural University/Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Ministry of Education, Nanchang 330045, China; 2. Shaoxing Academy of Agricultural Sciences of Zhejiang Province, Shaoxing, Zhejiang 312035, China)

收稿日期: 2023-10-28 修回日期: 2023-12-10

基金项目: 江西省现代农业产业技术体系建设专项(JXARS-18)和江西省芝麻良种联合攻关项目

Project supported by Special Project for the Construction of Modern Agricultural Industrial Technology System in Jiangxi Province(JXARS-18) and Joint Research Project of Improved Sesame Varieties in Jiangxi Province

作者简介: 万泽华, 硕士生, orcid.org/0009-0002-6198-056X, 1776817439@qq.com; *通信作者: 方圣, 讲师, 博士, 主要从事作物栽培生理研究, orcid.org/0000-0002-5575-549X, 1393684991@qq.com; 吴自明, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事作物栽培生理与遗传育种研究, orcid.org/0000-0002-8805-514X, wuzmjxau@163.com。

Abstract: [Objective] Waterlogging is one of the main obstacles affecting the growth of black sesame. Identification of waterlogging tolerance of black sesame germplasm resources at seedling stage and screen reliable evaluation indexes can provide theoretical basis for breeding and cultivation of waterlogging-tolerant black sesame varieties. [Method] 52 black sesame germplasm resources were selected as experimental materials and they were waterlogged for 7 days at seedling stage. Seven indexes, including seedling survival rate, plant height and root length, were measured, and the waterlogging tolerance coefficient of each index was calculated. Principal component analysis, membership function analysis, cluster analysis, correlation analysis and stepwise regression analysis were used to comprehensively evaluate the waterlogging tolerance of different black sesame germplasm resources and screen the waterlogging tolerance indexes. [Result] Seven indicators were simplified into four independent comprehensive indicators by principal component analysis, which contained 79.25% of all information; Based on the comprehensive evaluation results of waterlogging tolerance and the classification of waterlogging tolerance grades, five varieties with high waterlogging tolerance, 39 varieties with moderate waterlogging tolerance and eight varieties with waterlogging sensitivity were screened out. Correlation analysis showed that plant height, root length, aboveground biomass and underground biomass were the main influencing factors of comprehensive evaluation value, and there were also different degrees of correlation among all indexes. Four key indexes such as plant height, root length, aboveground biomass and underground biomass, were screened out from seven identification indexes by regression analysis. [Conclusion] Based on the above analysis, Poyang black sesame, Xingzi black sesame, Duoshuo black sesame, Duchang black sesame and 17-50 were the most waterlogging tolerant and can be used as excellent parents for breeding; The plant height, root length, aboveground biomass and underground biomass are critical indexes to rapidly identify the waterlogging-tolerance of sesame seedlings.

Keywords: black sesame; seedling stage; waterlogging tolerance; principal component analysis; clustering analysis; comprehensive evaluation

【研究意义】黑芝麻是我国特色优质油料作物,籽粒含有丰富的脂肪酸、蛋白质、维生素、氨基酸等重要营养成分,具有抗氧化、抗衰老等功效^[1],以黑芝麻为原料的营养保健品越来越受人们的青睐。江西是我国最大的黑芝麻主产区,黑芝麻种植面积和产量占全国60%以上,也是我国黑芝麻重要的出口基地^[2]。然而,江西黑芝麻种植区降水频繁,涝渍灾害频发,导致其生产上有较高的渍害发生风险^[3]。其中苗期受渍害最为常见,轻则使生长发育受阻,病虫害加重,严重时会导致因烂根、死苗而造成大规模的缺苗断垄^[4]。生产实践中,笔者发现不同基因型黑芝麻苗期耐渍性差异较为明显,表明黑芝麻种质资源中存在着耐渍性的变异^[5-6]。因此鉴定不同种质资源的耐渍性,培育耐渍品种,对于稳定黑芝麻产量意义重大。【前人研究进展】针对作物苗期耐渍性鉴定方面前人做了大量的工作,已筛选出一批优异的耐渍种质,但不同学者对耐渍性鉴定指标和鉴定分析方法的选择存在一定的差异。鉴定指标主要有株高、根长、叶面积等形态指标^[7-8]和丙二醛含量、可溶性糖含量、游离脯氨酸含量等生理生化指标^[9-10]。评价方法主要有主成分分析、隶属函数值法、频次分析、相关性分析、聚类分析、灰色关联度分析和逐步回归分析等^[11-13]。前人研究使用了不同的指标和鉴定方法都表明主成分分析法和隶属函数值法的结果基本一致。可见,主成分分析结合隶属函数值法是一种比较科学全面的综合评价方法,能更好的体现作物的耐渍性^[14],在作物耐渍性鉴定中已得到广泛应用。在芝麻耐渍性鉴定中,孙建等^[15]以存活株率、株高等13个性状的耐湿系数为鉴定指标,利用主成分分析和隶属函数值法将6个芝麻品种进行盛花期耐渍性综合评价;刘立峰等^[16]以平均萎蔫株率和平均死亡株率为鉴定指标对15个白芝麻品种进行盛花期耐渍性鉴定,鉴定到1个抗性优良品种和2个耐渍品种;丁霞等^[17]以正常株率、湿害产量和湿害减产率为鉴定指标,对我国43个芝麻品种进行盛花期耐湿性综合评价,发现有些品种在某些性状上耐湿性表现较好。

【本研究切入点】前人对芝麻耐渍性鉴定多集中在盛花期,而对苗期耐渍性鉴定及指标筛选研究较少。【拟解决的关键问题】针对江西黑芝麻生产上的渍害问题,本试验通过模拟特定的苗期水分胁迫环

境,对 52 个黑芝麻种质资源进行盆栽苗期渍水 7 d 处理,以存活率、株高、根长、根冠比、地上部生物量、地下部生物量、SPAD 值 7 个指标为鉴定指标,利用主成分分析、隶属函数分析法和聚类分析等多元统计方法鉴定芝麻的耐渍性,筛选出一批优异的苗期耐渍材料,明确耐渍性的评价指标,以期为芝麻耐渍害栽培及培育高产耐渍芝麻新品种提供材料基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

选取 52 份黑芝麻品种为试验材料,其中江西省地方种质 43 份,其他省份种质 9 份。编号、品种和来源详见表 1。

表 1 供试黑芝麻品种信息
Tab.1 Information of Black Sesame varieties tested

编号 No.	品种 Variety	来源 Origins	编号 No.	品种 Variety	来源 Origins
1	鄱阳黑芝麻	江西	27	WZM5	江西
2	珠湖	江西	28	WZM6	江西
3	星子黑芝麻	江西	29	WZM7	江西
4	黑芝麻 2834	江西	30	WZM8	江西
5	海会黑芝麻	江西	31	WZM9	江西
6	多荫黑芝麻	江西	32	WZM10	江西
7	武宁黑	江西	33	南昌县黑芝麻	江西
8	万年黑芝麻	江西	34	中芝 33	湖北
9	金沙江芝麻	江西	35	中芝 24	湖北
10	黑芝麻 2831	江西	36	中芝 HJ05	湖北
11	矮脚金黄麻	江西	37	中芝 H16	湖北
12	金黄麻	江西	38	中芝 35	湖北
13	都昌黑	江西	39	襄黑芝 207	湖北
14	新干黑芝麻	江西	40	邕宁黑芝麻	广西
15	高城黑芝麻	江西	41	峦山黑芝麻	湖南
16	赣芝 8 号	江西	42	济南黑芝麻	山东
17	赣芝 2 号	江西	43	17-25	江西
18	赣芝 9 号	江西	44	17-43	江西
19	赣芝 11 号	江西	45	17-46-1	江西
20	赣芝 7 号	江西	46	17-50	江西
21	赣芝 14 号	江西	47	17-51	江西
22	鹰潭芝麻	江西	48	17-57-2	江西
23	WZM1	江西	49	17-62	江西
24	WZM2	江西	50	17-76-1	江西
25	WZM3	江西	51	17-119	江西
26	WZM4	江西	52	17-156	江西

1.2 试验设计

利用盆栽渍水法进行黑芝麻苗期耐渍性鉴定试验。选取籽粒饱满、大小相近的芝麻籽粒均匀播种于花盆中(上口直径 10 cm,下底直径 8 cm,高 8 cm),花盆基质为大田耕土:营养土=1:1。当幼苗长至 2 片真叶时定苗(每盆留 3 株长势一致的植株),幼苗长至 4 片真叶时进行渍水 7 d 处理,保持盆中处于水分过饱和状态(土壤含水量达到 100%),对照组正常水管理。渍害结束后转入正常的水分管理条件下恢复 3 d,取样测定各项指标。各处理重复 5 组,采取随机区组设计。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 黑芝麻幼苗存活率

存活率(survival rate,SR)=(幼苗存活数/对照数)×100% (1)

1.3.2 植株生物量及根冠比

随机选取5株芝麻幼苗,用1/10 cm直尺测量株高和根长。

地上部生物量测定:取处理及对照幼苗的茎基部与根系节点以上的部分,置于烘箱内烘干至恒重,记录样品干重。

地下部生物量测定:取植株茎基部与根系节点以下的部分用去离子水清洗干净后吸干水分,置于烘箱内烘干至恒重,记录样品干重。

根冠比=地下部干重/地上部干重 (2)

1.3.3 叶片 SPAD 值

SPAD仪测定:测定新鲜完好的倒数第4片功能叶的SPAD值。每个叶片测定3次,计算平均值。

1.4 数据统计与分析

利用Excel对数据进行整理并计算耐渍系数,采用SPSS 25进行主成分分析、隶属函数值分析、综合评价和聚类分析等多元统计分析。采用R studio进行作图。以黑芝麻苗期7个耐渍指标为基础,通过主成分分析将单个指标转化为4个综合指标(CI),再利用隶属函数法评价芝麻耐渍性。具体计算如下:单项指标耐渍系数(waterlogging resistance coefficient, WRC)=渍害处理下各指标测定值/正常条件下各指标测定值。隶属函数值为:

$$\mu(X_j) = (X_j - X_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min}) \quad (3)$$

式(3)中, μ 表示隶属函数值, X_j 、 $X_{j\min}$ 、 $X_{j\max}$ 分别示第 j 个指标及第 j 个综合指标的最小值和最大值, $j=1, 2, 3, \dots, n$ 。

$$\text{综合指标权重: } w_j = p_j \div \sum_{j=1}^n p_j \quad (4)$$

式(5)中: p_j 代表第 j 个主成分的贡献率, $j=1, 2, 3, \dots, n$ 。

各芝麻品种的综合耐渍能力的大小:

$$D = \sum_{j=1}^n [\mu(X_j) \times w_j] \quad (5)$$

式(5)中, $j=1, 2, 3, \dots, n$ 。

2 结果与分析

2.1 单项指标的耐渍系数

由表2可知,52份黑芝麻品种在渍水胁迫下,存活率的耐渍系数变幅为0.67~0.93,平均值0.85;株高的耐渍系数变幅为0.54~1.10,平均值0.80;根长的耐渍系数变幅为0.23~0.62,平均值0.38;地上部生物量的耐渍系数变幅为0.34~1.52,平均值0.78;地下部生物量的耐渍系数变幅为0.35~1.29,平均值0.64;根冠比的耐渍系数变幅为0.28~2.35,平均值1.15;SPAD值的耐渍系数变幅为0.74~1.16,平均值1.0。52个品种苗期各指标耐渍系数的变异系数也存在差异,其中根冠比变异系数最大,存活率的变异系数最小,因此可以对黑芝麻种质资源进行耐渍性鉴定。

表2 52份黑芝麻品种各性状耐渍系数(WRC)

Tab.2 The waterlogging resistance coefficients of 52 black sesame varieties

品种 Varieties	存活率 Survival rate	株高 Plant height	根长 Root length	地上部生物量 Aboveground biomass	地下部生物量 Underground biomass	根冠比 Root shoot ratio respectively	SPAD值 SPAD value
1	0.93	1.10	0.46	1.23	0.77	1.59	1.06
2	0.87	1.07	0.35	1.17	0.53	2.35	0.80
3	0.87	1.06	0.47	0.89	0.71	1.51	0.95
4	0.93	1.00	0.34	0.82	0.46	1.59	1.16
5	0.87	0.86	0.32	0.81	0.50	2.24	1.07
6	0.87	0.79	0.44	0.91	1.17	1.35	0.99
7	0.93	0.80	0.29	0.68	0.50	1.65	1.10
8	0.87	0.78	0.36	0.61	0.59	1.16	0.99
9	0.73	1.05	0.36	1.45	0.67	2.22	1.10
10	0.87	0.83	0.34	1.01	0.77	1.38	1.05
11	0.87	0.79	0.42	0.84	0.60	1.61	1.08
12	0.67	0.63	0.39	0.67	0.66	1.25	1.04

续表							
品种 Varieties	存活率 Survival rate	株高 Plant height	根长 Root length	地上部生物量 Aboveground biomass	地下部生物量 Underground biomass	根冠比 Root shoot ratio respectively	SPAD 值 SPAD value
13	0.87	0.80	0.62	0.69	1.29	0.62	0.90
14	0.87	0.89	0.41	0.72	0.52	1.59	0.98
15	0.80	1.00	0.40	0.84	0.68	1.62	1.05
16	0.87	0.75	0.41	0.64	0.69	1.22	1.07
17	0.87	0.70	0.39	0.66	0.75	1.22	1.10
18	0.87	0.87	0.39	0.50	0.50	1.55	1.04
19	0.80	0.84	0.38	0.95	0.92	1.44	1.09
20	0.87	0.75	0.48	0.84	0.55	0.67	0.81
21	0.80	0.74	0.36	0.66	0.63	1.12	0.97
22	0.87	0.92	0.48	0.96	0.68	0.68	0.95
23	0.93	0.77	0.23	0.77	0.39	0.52	1.11
24	0.80	0.59	0.46	0.41	1.15	1.29	0.78
25	0.8	0.77	0.37	0.60	0.64	0.85	1.07
26	0.87	0.71	0.25	0.71	0.45	0.56	1.13
27	0.87	0.76	0.30	0.49	0.70	0.98	0.81
28	0.87	0.63	0.47	0.54	0.48	0.88	1.05
29	0.87	0.75	0.47	0.59	0.61	0.99	0.82
30	0.87	0.65	0.44	0.66	0.78	0.81	1.01
31	0.93	0.81	0.40	0.75	0.62	0.92	1.03
32	0.93	0.77	0.31	0.75	0.53	0.67	1.04
33	0.87	0.90	0.29	1.03	0.55	0.54	0.74
34	0.87	0.74	0.36	1.13	0.83	0.76	0.99
35	0.87	0.63	0.38	0.67	0.65	0.85	0.96
36	0.87	0.82	0.35	0.72	0.56	0.76	1.02
37	0.87	0.61	0.41	0.48	0.55	0.87	1.04
38	0.73	0.70	0.28	0.62	0.42	0.75	0.96
39	0.80	0.85	0.38	0.90	0.91	2.02	0.86
40	0.80	0.71	0.34	0.81	0.70	0.72	0.99
41	0.80	0.77	0.45	0.70	0.56	0.59	0.98
42	0.80	0.96	0.38	0.89	0.75	0.76	0.98
43	0.87	0.77	0.32	0.57	0.51	0.79	1.08
44	0.87	0.78	0.34	0.80	0.61	0.63	1.06
45	0.87	0.83	0.38	0.72	0.52	0.65	0.92
46	0.87	1.06	0.43	1.52	0.67	0.48	1.00
47	0.87	0.86	0.38	0.74	0.51	0.49	1.11
48	0.87	0.65	0.30	0.66	0.47	0.68	1.14
49	0.87	0.86	0.55	0.72	0.54	0.68	1.06
50	0.87	0.93	0.27	1.31	0.53	0.49	1.06
51	0.80	0.54	0.44	0.34	0.35	0.28	0.90
52	0.80	0.70	0.43	0.98	0.79	0.53	1.11
最大值 Max	0.93	1.10	0.62	1.52	1.29	2.35	1.16
最小值 Min	0.67	0.54	0.23	0.34	0.35	0.28	0.74
平均值 Average	0.85	0.80	0.38	0.78	0.64	1.15	1.00
标准偏差 Standard deviation	0.052 3	0.131 6	0.074 2	0.242 2	0.187 8	0.505 8	0.100 1
变异系数/% Coefficient variation	6.2	16.5	19.5	31.1	29.3	44.0	10.0

2.2 芝麻苗期耐渍性指标的主成分分析

为将各指标转换为彼此独立且具有代表性的综合指标,从而更清晰的解析黑芝麻苗期的耐渍性的

构成。基于 52 个黑芝麻种质资源的 7 个苗期单项指标耐渍系数进行主成分分析,由表 3 可知,CI₁、CI₂、CI₃ 和 CI₄ 4 个主成分特征值分别为 1.98、1.74、1.03 和 0.81,贡献率分别为 28.31%、24.79%、14.65% 和 11.51%,累计贡献率达到 79.25%,这 4 个主成分可以代表 7 个指标的大部分信息。在主成分 CI₁ 中,株高和地上部生物量载荷值较高,均在 0.80 以上,因此可将该主成分归为地上部因子,是耐渍性鉴定的第一重要指标;主成分 CI₂ 中,根长和地下部生物量载荷较高,分别为 0.764 和 0.798,可将该主成分归为地下部因子,是耐渍性鉴定的第二重要指标;主成分 CI₃ 主要受存活率的影响,其载荷值最高,达到 0.842,因此可以把为 CI₃ 归为存活率因子;主成分 CI₄ 主要受 SPAD 值影响,载荷值达到 0.863,可将该主成分归为叶片 SPAD 值因子。

表 3 各综合指标的特征值及贡献率
Tab.3 Coefficients and contribution rates of comprehensive indexes

指标 Indicators	综合指标 Comprehensive index			
	CI ₁	CI ₂	CI ₃	CI ₄
存活率 Survival rate	0.129	-0.364	0.842	0.036
株高 Plant height	0.915	-0.092	0.134	-0.133
根长 Root length	0.006	0.764	0.354	0.288
地上部生物量 Aboveground biomass	0.842	0.055	0.015	-0.090
地下部生物量 Underground biomass	0.205	0.798	-0.034	0.289
根冠比 Root shoot ratio respectively	0.608	0.093	-0.402	0.116
SPAD 值 SPAD value	0.080	-0.602	-0.098	0.773
特征值 Eigenvalue	1.98	1.74	1.03	0.81
贡献率/% Contribution rate	28.31	24.79	14.65	11.51
累计贡献率/% Cumulative contribution rate	28.31	53.10	67.75	79.25

2.3 品种耐渍性综合评价及聚类分析

为了进一步对不同芝麻品种进行耐渍性等级划分和分类,以主成分分析得到的 4 个综合指标计算隶属函数值[$\mu(X_j)$],然后根据公式计算各综合指标的权重(w_j),分别为 35%、31%、20% 和 14%,再基于每个指标的权重计算得到不同芝麻品种耐渍性综合评价 D 值,利用 D 值的大小判断耐渍性的强弱, D 值越大耐渍性越强。由表 4 可知,耐渍性较强的前 5 为都昌黑、鄱阳黑、多萌黑芝麻、星子黑、17-50,耐渍性较弱的后 5 名为 17-57-2、WZM-1、WZM-4、17-119 和中芝 35。为了更好地对芝麻耐渍性进行综合分级评价,对 D 值进行聚类分析(图 1),可将 52 个芝麻品种划分为 3 个大类:第 I 类为高度耐渍品种 5 个($D \geq 0.66$),占供试材料的 9.6%;第 II 类为渍害敏感品种 8 个($0.41 \geq D \geq 0.28$),占供试材料的 15.4%;第 III 类为中度耐渍品种 39 个($0.62 \geq D \geq 0.43$)占供试材料的 75%。

表 4 52 份黑芝麻种质的 $\mu(X_j)$ 、 w_j 、 D 值及综合评价
Tab.4 $\mu(X_j)$ 、 w_j 、 D -value and comprehensive evaluation of 52 black sesame germplasm

编号 No.	综合指标 Comprehensive index				隶属函数值 Membership function				D 值 D value	综合评价 Comprehensive evaluation
	CI ₁	CI ₂	CI ₃	CI ₄	$\mu(X_1)$	$\mu(X_2)$	$\mu(X_3)$	$\mu(X_4)$		
1	3.38	0.01	2.00	0.72	0.95	0.40	1.00	0.87	0.78	高度耐渍
2	3.24	0.07	-0.23	-2.20	0.93	0.41	0.58	0.22	0.60	中度耐渍
3	1.96	1.02	0.38	-0.19	0.75	0.54	0.69	0.67	0.66	高度耐渍
4	1.59	-2.16	0.84	0.82	0.70	0.10	0.78	0.89	0.56	中度耐渍
5	1.29	-1.28	-0.90	0.33	0.66	0.22	0.45	0.78	0.50	中度耐渍
6	0.97	2.10	0.52	1.09	0.61	0.69	0.72	0.96	0.70	高度耐渍
7	0.23	-1.83	-0.17	0.44	0.51	0.14	0.59	0.81	0.45	中度耐渍
8	-0.52	-0.30	-0.06	-0.17	0.40	0.35	0.61	0.67	0.47	中度耐渍
9	3.75	-0.20	-2.51	0.48	1.00	0.37	0.14	0.82	0.61	中度耐渍
10	1.07	-0.18	-0.47	0.40	0.63	0.37	0.53	0.80	0.55	中度耐渍

续表										
编号 No.	综合指标 Comprehensive index				隶属函数值 Membership function				<i>D</i> 值 <i>D</i> value	综合评价 Comprehensive evaluation
	CI ₁	CI ₂	CI ₃	CI ₄	$\mu(X_1)$	$\mu(X_2)$	$\mu(X_3)$	$\mu(X_4)$		
11	0.56	-0.22	-0.12	0.91	0.55	0.37	0.60	0.91	0.56	中度耐渍
12	-1.30	0.94	-3.25	0.58	0.29	0.53	0.00	0.84	0.38	渍害敏感
13	-0.11	4.38	1.73	1.16	0.46	1.00	0.95	0.97	0.80	高度耐渍
14	0.63	-0.12	0.00	-0.22	0.56	0.38	0.62	0.66	0.53	中度耐渍
15	1.51	0.32	-1.42	0.41	0.69	0.44	0.35	0.80	0.56	中度耐渍
16	-0.43	0.12	-0.11	0.95	0.42	0.41	0.60	0.92	0.52	中度耐渍
17	-0.53	-0.05	0.06	1.29	0.40	0.39	0.63	1.00	0.53	中度耐渍
18	-0.07	-0.52	-0.34	0.29	0.47	0.32	0.55	0.78	0.48	中度耐渍
19	1.08	0.72	-1.23	1.18	0.63	0.49	0.39	0.98	0.59	中度耐渍
20	-0.57	1.14	1.47	-1.47	0.40	0.55	0.90	0.38	0.54	中度耐渍
21	-0.74	0.29	-1.26	-0.30	0.37	0.44	0.38	0.64	0.43	中度耐渍
22	0.70	0.94	1.00	-0.29	0.57	0.53	0.81	0.65	0.62	中度耐渍
23	-0.76	-2.87	0.43	-0.24	0.37	0.00	0.70	0.66	0.36	渍害敏感
24	-1.65	3.92	-1.18	-0.31	0.25	0.94	0.40	0.64	0.55	中度耐渍
25	-0.89	-0.16	-0.87	0.55	0.35	0.37	0.45	0.84	0.45	中度耐渍
26	-1.19	-2.35	-0.28	0.21	0.31	0.07	0.57	0.76	0.35	渍害敏感
27	-1.11	0.51	-0.34	-1.79	0.32	0.47	0.55	0.31	0.41	渍害敏感
28	-1.69	-0.07	0.76	0.77	0.24	0.39	0.76	0.88	0.48	中度耐渍
29	-0.87	1.32	1.09	-1.13	0.35	0.58	0.83	0.46	0.53	中度耐渍
30	-1.12	0.78	0.84	0.72	0.32	0.50	0.78	0.87	0.55	中度耐渍
31	-0.09	-0.36	1.06	0.27	0.46	0.35	0.82	0.77	0.54	中度耐渍
32	-0.57	-1.47	0.93	-0.21	0.40	0.19	0.80	0.67	0.45	中度耐渍
33	0.44	-0.12	0.60	-3.20	0.54	0.38	0.73	0.00	0.45	中度耐渍
34	0.43	0.34	0.28	-0.04	0.54	0.44	0.67	0.70	0.56	中度耐渍
35	-1.36	0.28	0.01	-0.18	0.29	0.43	0.62	0.67	0.45	中度耐渍
36	-0.43	-0.62	-0.09	-0.22	0.42	0.31	0.60	0.66	0.45	中度耐渍
37	-1.89	-0.28	0.58	0.60	0.21	0.36	0.73	0.85	0.45	中度耐渍
38	-1.62	-0.80	-2.07	-1.16	0.25	0.29	0.22	0.45	0.28	渍害敏感
39	1.35	1.90	-1.71	-0.68	0.67	0.66	0.29	0.56	0.57	中度耐渍
40	-0.78	0.15	-0.89	-0.23	0.37	0.42	0.45	0.66	0.44	中度耐渍
41	-0.94	0.51	0.04	-0.13	0.34	0.47	0.63	0.68	0.49	中度耐渍
42	0.79	0.41	-0.13	-0.36	0.59	0.45	0.59	0.63	0.55	中度耐渍
43	-1.05	-1.23	-0.38	0.22	0.33	0.23	0.55	0.76	0.40	渍害敏感
44	-0.49	-0.73	-0.10	0.15	0.41	0.29	0.60	0.75	0.46	中度耐渍
45	-0.52	-0.17	0.59	-1.06	0.40	0.37	0.73	0.48	0.47	中度耐渍
46	2.62	0.09	0.91	-0.55	0.84	0.41	0.79	0.59	0.66	高度耐渍
47	-0.33	-1.24	0.96	0.51	0.43	0.22	0.80	0.82	0.50	中度耐渍
48	-1.48	-1.87	-0.18	0.67	0.27	0.14	0.59	0.86	0.37	渍害敏感
49	-0.16	0.40	1.91	0.92	0.45	0.45	0.98	0.92	0.62	中度耐渍
50	1.42	-1.98	0.57	-0.69	0.67	0.12	0.73	0.56	0.50	中度耐渍
51	-3.40	0.14	0.57	-0.88	0.00	0.41	0.73	0.52	0.35	渍害敏感
52	-0.35	0.38	0.18	1.27	0.43	0.45	0.65	0.99	0.56	中度耐渍
权重 Weight					0.35	0.31	0.20	0.14		

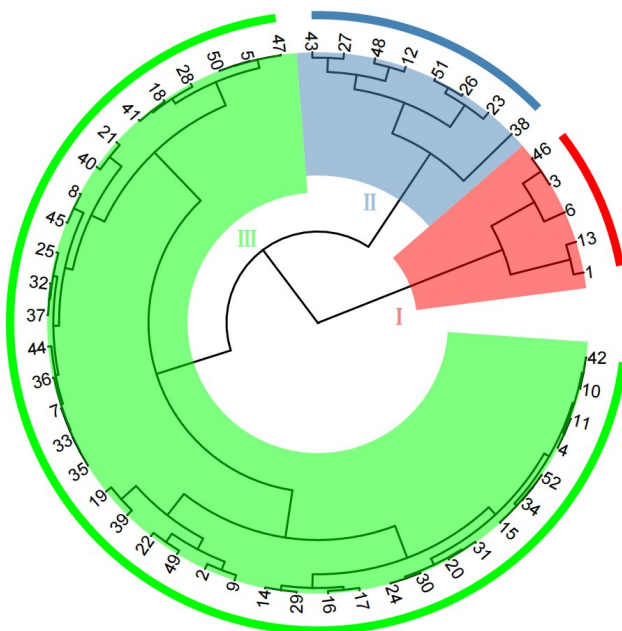
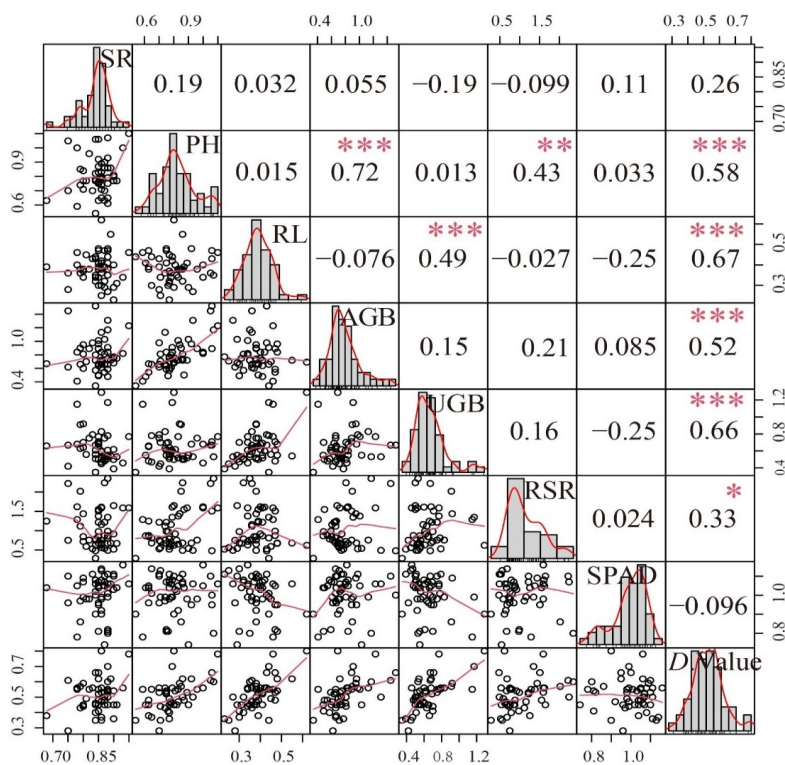


图 1 基于耐渍综合评价 D 值的黑芝麻品种聚类分析

Fig.1 Cluster image of black sesame varieties based on D value of comprehensive evaluation of waterlogging tolerance

2.4 芝麻苗期耐渍性鉴定指标的相关性分析

对 52 份黑芝麻的 7 个指标和 D 值进行相关性分析(图 2),结果表明,株高、根长、地上部生物量、地下



SR:存活率;PH:株高;RL:根长;AGB:地上部生物量;RGB:地下部生物量;RSR:根冠比;SPAD:SPAD 值。*、**和***分别表示在 0.05、0.01、0.001 水平显著相关。

SR: Survival rate; PH: Plant height; RL: Root length; AGB: Aboveground biomass; RGB: Underground biomass; RSR: Root shoot ratio respectively; SPAD: SPAD value. *, ** and *** mean significant correlation at the 0.05, 0.01, and 0.001 probability levels, respectively.

图 2 52 份黑芝麻种质资源渍害胁迫下各性状和耐渍综合评价 D 值相关性分析

Fig.2 Correlation analysis between characters and comprehensive evaluation D -value of waterlogging tolerance of 52 black sesame germplasm resources under waterlogging stress

部生物量与 D 值呈极显著正相关,相关系数(R)分别为0.58、0.67、0.52和0.66,根冠比与 D 值呈显著正相关,相关系数(R)为0.33;株高与地上部、根冠比呈极显著正相关,相关系数(R)分别为0.72、0.43;根长与地下部生物量呈极显著正相关,相关系数(R)达到0.49;由此可看出,株高、根长、地上部生物量、地下部生物量是 D 值的主要影响因子,且各指标之间也有着不同程度的相关性,充分说明芝麻苗期耐渍性是一个综合性状,不能从单一指标评价芝麻的耐渍性,需要将各指标综合考虑。

2.5 回归模型的建立及指标筛选

为了有效分析7个苗期指标与不同芝麻品种苗期耐渍性的关系,以综合评价值 D 和7个指标为基础, D 值作为因变量,7个指标作为自变量建立最优回归方程。芝麻耐渍性回归方程: $Y=0.692X_3+0.087X_4+0.206X_5+0.326X_2-0.217$, X_3 =根长、 X_4 =地上部生物量、 X_5 =地下部分生物量、 X_2 =株高,方程相关系数 $r=0.963$,校正 $R^2=0.921$, $F=149.739$ 达到极显著水平,这4个指标可以解释 D 值92.1%的变异,表明该回归方程可以很好的预测黑芝麻种质资源的耐渍性。因此,采用本研究中的芝麻苗期耐渍性鉴定评价体系,只需调查株高、根长、地上部生物量和地下部生物量4个指标,计算其相应的耐渍系数,然后利用上述回归方程即可估算获得综合评价 D 值来判断芝麻种质资源的耐渍性。

3 讨论

渍害对作物最主要的危害是次生胁迫,包括低氧、营养物质缺乏、有毒有害物质产生等^[18]。在长期进化中,作物已经建立了多种耐渍机制来适应逆境条件,如形成通气组织^[19]、活性氧代谢^[20]、渗透调节^[21]和激素调节^[22]等。目前,有关芝麻的耐渍机制还需要进一步深入研究。进行芝麻种质资源耐渍性鉴定,对于芝麻耐渍机制研究、耐渍性品种选育具有重要意义。

3.1 黑芝麻苗期耐渍性评价方法

选择合适的评价方法是鉴定物耐渍性的前提。主成分分析与隶属函数值法相结合是一种较为科学全面的综合鉴定方法,在水稻^[23-24]、甘薯^[25]、棉花^[26-28]、大豆^[29-30]等作物的抗逆性研究中已被广泛应用。本研究利用主成分分析将7个指标转化为4个新的相互独立的综合指标,累计贡献率达到79.25%,可以代表7个指标的绝大部分信息。这不仅降低了各指标所代表信息的交叉重叠,同时也表明了各综合指标具有不同的重要性,能更加科学全面地评价黑芝麻苗期耐渍性。利用主成分分析的综合指标为基础的隶属函数值法,可以更好的评价不同物种间或不同品种间的耐渍性^[14]。本研究以主成分分析的综合指标为基础利用隶属函数法得到综合指标权重,对52份黑芝麻品种进行综合评价发现,综合评价结果与耐渍等级划分结果基本一致。说明主成分分析结合隶属函数值法是可靠的芝麻苗期耐渍性鉴定方法。

3.2 黑芝麻苗期耐渍性评价指标筛选

作物的耐渍性是一个复杂的综合性状,受多因素影响,且各因素之间具有不同的关系和重要性^[31]。单一指标并不能准确的反映作物的耐渍性,而对多个指标进行测定,不仅耗时耗力,且各个指标之间存在着不同程度的相关性,使其提供的信息发生交叉重叠,也很难全面客观的鉴定作物耐渍性。因此,需要筛选合适的评价指标^[32]。李真等^[33]评价甘蓝型油菜苗期耐湿性时,筛选到地上部干重、根干重和总干重耐湿系数可作为主要评价指标。龚政^[34]在评价不同玉米品种苗期抗涝性时,则筛选出不定根的表面积和体积作为主要的鉴定指标。但目前对芝麻苗期耐渍性评价指标没有统一的标准。在本研究中,选取了株高、根长和地上部生物量等7个操作性强且可简易获取的表型指标来鉴定芝麻苗期耐渍性,涵盖了芝麻地上部和地下部的形态指标,能较为全面的反映芝麻幼苗在遭受渍害胁迫时的形态变化,且采用耐渍系数来反映不同种质的耐渍性,消除了种间固有差异。通过对7个性状进行逐步回归分析,建立了芝麻耐渍性综合评价值 D 的回归方程,根据主成分分析、相关性分析和回归分析结果的共有指标,确定了株高、根长、地上部生物量和地下部分生物量作为耐渍性鉴定的首选指标。通过调查这4个指标即可估算获得其综合评价 D 值来对芝麻耐渍性鉴定,从而使得芝麻耐渍性的鉴定与利用研究更简便高效。

3.3 黑芝麻苗期耐渍性种质筛选

优良耐渍亲本的选用是决定芝麻耐渍育种效率的关键。本研究通过对 D 值进行聚类分析,将供试

52份黑芝麻种质分为高度耐渍、中度耐渍和耐渍敏感3种类型,鄱阳黑芝麻,星子黑芝麻,都昌黑,17-50和多蒴黑芝麻为高度耐渍品种,在渍水胁迫条件下这5个品种相对其他品种的株高、根长、地上部生物量和地下部生物量的耐渍系数较高,且其他各性状的耐渍系数相对较高,综合评价 D 值排名前列。在52份黑芝麻种质资源中,有43份来自江西,占总资源的82.7%。其中仅有5份高度耐渍品种,占11.6%,说明江西省高耐渍性黑芝麻种质资源仍相对缺乏。来自其他省份的9份黑芝麻核心种质均为中度耐渍或渍害敏感品种,耐渍性较差,这与生产实践一致。本试验采取盆栽渍水法鉴定芝麻的苗期耐渍性,该鉴定方法简单直接且便于控制单一因素变量。对这些耐渍性种质的鉴定,能够深入剖析优良耐渍品种的特性,为培育高产耐渍芝麻新品种和耐渍基因的发掘提供了重要资源。

4 结 论

本研究对52个不同黑芝麻品种进行苗期耐渍性鉴定,筛选得到耐渍性强的5个品种:鄱阳黑芝麻,星子黑芝麻、都昌黑、17-50和多蒴黑芝麻,可供耐渍基因挖掘和耐渍品种选育等利用。综合主成分分析、相关性分析和逐步回归分析,确定株高、根长、地上部生物量和地下部分生物量可以作为芝麻苗期耐渍性快速鉴定指标。

参考文献 References:

- [1] 封铎,张锦丽,李向阳,等.黑芝麻的营养成分及保健价值研究进展[J].粮油食品科技,2018,26(5):36-41.
FENG H,ZHANG J L,LI X Y,et al. Research progress of nutritional components and health value of black sesame[J].Science and technology of cereals,oils and foods,2018,26(5):36-41.
- [2] 宋海峰.江西黑芝麻产量占全国六成[N].江西日报,2006-09-15(B02).
SONG H F.Jiangxi black sesame production accounts for 60% of the country[N].Jiangxi daily,2006-09-15(B02).
- [3] 孙建,乐美旺,饶月亮,等.江西芝麻产业现状、限制因素、发展潜力与对策分析[J].江西农业学报,2010,22(9):10-15.
SUN J,LE M W,RAO Y L,et al.Current situation,limiting factors,developmental potential and countermeasures of sesame industry in Jiangxi[J].Acta agriculturae Jiangxi,2010,22(9):10-15.
- [4] 高桐梅,吴寅,李丰,等.苗期水分胁迫对芝麻生长和生理特性的影响[J].核农学报,2017,31(11):2229-2235.
GAO T M,WU Y,LI F,et al.Effects of water stress on physiological characteristics and growth under water stress in seedling of sesame[J].Journal of nuclear agriculture,2017,31(11):2229-2235.
- [5] 潘华,周红英,孙建,等.苗期湿害胁迫下不同基因型芝麻的反应差异研究[J].江西农业学报,2015,27(1):24-27.
PAN H,ZHOU H Y,SUN J,et al.Study on difference in response of different genotypic sesame seedlings to waterlogging stress[J].Acta agriculturae Jiangxi,2015,27(1):24-27.
- [6] 孟凡庭,贾东坡,刘华山,等.渍涝对芝麻幼苗叶片中有机物质含量及水分状态的影响[J].河南农业大学学报,2007(4):374-376.
MENG F T,JIA D P,LIU H S,et al.Effect of waterlogging on contents of organic compounds and water in sesame seedling leaves[J].Journal of Henan agricultural university,2007(4):374-376.
- [7] 冯晓冰,潘锐,胡爱兵,等.基于光谱特征的棉花苗期耐涝性鉴定[J].植物遗传资源学报,2022,23(2):553-562.
FENG X B,PAN R,HU A B,et al.Identification of cotton seedling waterlogging tolerance based on spectral imaging technology[J].Journal of plant genetic resources,2022,23(2):553-562.
- [8] 高建芹,陈锋,龙卫华,等.长江下游甘蓝型油菜种质耐湿性鉴定[J].江苏农业科学,2023,51(6):79-86.
GAO J Q,CHEN F,LONG W H,et al.Identification of wet resistance of *Brassica napus* L. in the lower reaches of Yangtze River Basin[J].Jiangsu agricultural sciences,2023,51(6):79-86.
- [9] 周广生,梅方竹,周竹青,等.小麦不同品种耐湿性生理指标综合评价及其预测[J].中国农业科学,2003(11):1378-1382.
ZHOU G S,MEI F Z,ZHOU Z Q,et al.Comprehensive evaluation and forecast on physiological indices of waterlogging resistance of different wheat varieties[J].Scientia agricultura Sinica,2003(11):1378-1382.
- [10] 王露.茄子种质资源苗期耐涝性鉴定、遗传效应及关联分析[D].扬州:扬州大学,2018.

- WANG L.The waterlogging tolerance evaluation ,genetic and association analysis with waterlogging tolerance of eggplant at seeding stage[D].Yangzhou:Yangzhou University,2018.
- [11] 王永强,姚梦楠,周恩强,等.萌发期大豆种质耐涝性鉴定[J].江苏农业科学,2022,50(18):169-174.
- WANG Y Q,YAO M N,ZHOU E Q,et al.Identification of waterlogging tolerance of soybean germplasm at germination stage [J].Jiangsu agricultural sciences,2022,50(18):169-174.
- [12] 王军,周美学,许如根,等.大麦耐湿性鉴定指标和评价方法研究[J].中国农业科学,2007,40(10):2145-2152.
- WANG J,ZHOU M X,XU R G,et al.Studies on selecting indices and evaluation methods for barley's(*Hordeum vulgare* L.) waterlogging tolerance[J].Scientia agricultura Sinica,2007,40(10):2145-2152.
- [13] 唐章林,王霖,张娅茹,等.甘蓝型油菜种质资源苗期耐湿性综合评价与筛选[J].西南大学学报(自然科学版),2022,44(12):19-28.
- TANG Z L,WANG L,ZHANG Y R,et al.Comprehensive evaluation and screening of waterlogging resistance at seedling stage of brassica napus[J].Journal of Southwest university (natural science edition),2022,44(12):19-28.
- [14] 胡亮亮,王素华,王丽侠,等.绿豆种质资源苗期耐盐性鉴定及耐盐种质筛选[J].作物学报,2022,48(2):367-379.
- HU L L,WANG S H,WANG L X,et al.Identification of salt tolerance and screening of salt tolerant germplasm of mungbean (*Vigna radiate* L.)at seedling stage[J].Acta agronomica Sinica,2022,48(2):367-379.
- [15] 孙建,张秀荣,张艳欣,等.芝麻不同品种(系)耐湿性的综合评价[J].中国油料作物学报,2008,30(4):518-521.
- SUN J,ZHANG X R,ZHANG Y X,et al.Comprehensive evaluation of waterlogging tolerance of different sesame varieties [J].Chinese journal of oil crop sciences,2008,30(4):518-521.
- [16] 刘立峰,郑磊,张仙美,等.部分芝麻新品种耐渍性鉴定[J].作物杂志,2012,149(4):98-101.
- LIU L F,ZHENG L,ZHANG X M,et al.Identification of WPA tolerance of some new sesame varieties[J].Crops,2012,149(4):98-101.
- [17] 丁霞,王林海,张艳欣,等.我国芝麻主栽品种耐湿性鉴定分析[J].华北农学报,2012,27(4):89-93.
- DING X,WANG L H,ZHANG Y X,et al.Evaluation of the waterlogging tolerance of the main sesame cultivars in China[J].Acta agriculturae Boreali-Sinica,2012,27(4):89-93.
- [18] 黄万勇,吉陈丽.渍害对作物生理生长指标的影响研究现状[J].浙江水利科技,2019,47(3):12-15.
- HUANG W Y,JI C L.Research status of effect on physiology and growth characteristics of crops under waterlogging damage condition[J].Zhejiang hydrotechnics,2019,47(3):12-15.
- [19] 巩方平.玉米不定根通气组织形成及耐涝性的机制研究[D].郑州:河南农业大学,2019.
- GONG F P.Study on the mechanism of root aerenchyma formation and waterlogging tolerance of maize [D].Zhengzhou: Henan Agricultural University,2019.
- [20] LUAN H ,SHEN H ,PAN Y ,et al.Elucidating the hypoxic stress response in barley(*Hordeum vulgare* L.)during waterlogging:a proteomics approach[J].Scientific reports,2018,8(1):9655.
- [21] 张永吉.不结球白菜耐湿性鉴定及其生理机制研究[D].南京:南京农业大学,2011.
- ZHANG Y J.Research on waterlogging tolerance identification and the mechanism in non-headingchinese cabbage(*Brassica campestris* ssp. *chinensis* makino)[D].Nanjing:Nanjing Agricultural University,2011.
- [22] 王文泉,郑永战,梅鸿猷,等.不同耐渍基因型芝麻在厌氧胁迫下根系的生理与结构变化[J].植物遗传资源学报,2003(3):214-219.
- WANG W Q,ZHENG Y Z,MEI H X,et al.Physiological and structural adaptation in roots of genotypes with different tolerance to waterlogging in sesame(*Sesamum indicum* L.)under anoxia stress[J].Journal of plant genetic resources,2003(3):214-219.
- [23] 田蕾,陈亚萍,刘俊,等.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,et al.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.
- [24] 钟艳平,李祖军,唐双勤,等.直播早籼稻品种芽期耐淹性鉴定研究[J].江西农业大学学报,2020,42(1):1-9.
- ZHONG Y P,LI Z J,TANG S Q,et al.Identification of flooding tolerance of direct-seeded early indica rice varieties at bud stage[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2020,42(1):1-9.
- [25] 范文静,刘明,赵鹏,等.甘薯苗期耐低氮基因型筛选及不同氮效率类型综合评价[J].中国农业科学,2022,55(10):1891-1902.

- FAN W J, LIU M, ZHAO P, et al. Screening of sweetpotato varieties tolerant to low nitrogen at seedling stage and evaluation of different nitrogen efficiencies[J]. *Scientia agricultura Sinica*, 2022, 55(10): 1891-1902.
- [26] 张陇艳, 程功敏, 魏恒玲, 等. 陆地棉种子萌发期对低温胁迫的响应及耐冷性鉴定[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(1): 19-33.
- ZHANG L Y, CHENG G M, WEI H L, et al. Chilling tolerance identification and response to cold stress of *Gossypium hirsutum* varieties(Lines) during germination stage[J]. *Scientia agricultura Sinica*, 2021, 54(1): 19-33.
- [27] 沈倩, 张思平, 刘瑞华, 等. 棉花出苗期耐冷综合评价体系的构建及耐冷指标筛选[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(22): 4342-4355.
- SHEN Q, ZHANG S P, LIU R H, et al. Construction of a comprehensive evaluation system and screening of cold tolerance indicators for cold tolerance of cotton at seedling emergence stage[J]. *Scientia agricultura Sinica*, 2022, 55(22): 4342-4355.
- [28] 祝令晓, 宋世佳, 李浩然, 等. 基于耐低氮综合指数的棉花苗期耐低氮品种筛选[J]. *作物学报*, 2022, 48(7): 1800-1812.
- ZHU L X, SONG S J, LI H R, et al. Screening of low nitrogen tolerant cultivars based on low nitrogen tolerance comprehensive index at seeding stage in cotton[J]. *Acta agronomica Sinica*, 2022, 48(7): 1800-1812.
- [29] 汤复跃, 梁江, 郭小红, 等. 广西间作大豆耐荫性综合评价及鉴定指标筛选[J]. *大豆科学*, 2022, 41(6): 645-653.
- TANG F Y, LIANG J, GUO X H, et al. Comprehensive evaluation and identification index screening of shade tolerance of intercropping soybean in Guangxi[J]. *Soybean science*, 2022, 41(6): 645-653.
- [30] 宋丽君, 聂晓玉, 何磊磊, 等. 饲用大豆品种耐荫性鉴定指标筛选及综合评价[J]. *作物学报*, 2021, 47(9): 1741-1752.
- SONG L J, NIE X Y, HE L L, et al. Screening and comprehensive evaluation of shade tolerance of forage soybean varieties[J]. *Acta agronomica Sinica*, 2021, 47(9): 1741-1752.
- [31] 佟汉文, 刘易科, 朱展望, 等. 作物耐渍鉴定与评价方法的研究进展[J]. *作物杂志*, 2015(6): 10-15.
- TONG H W, LIU Y K, ZHU Z W, et al. Progress on identification and evaluation of waterlogging tolerance in crops[J]. *Crops*, 2015(6): 10-15.
- [32] 张静, 高文博, 晏林, 等. 燕麦种质资源耐盐碱性鉴定评价及耐盐碱种质筛选[J]. *作物学报*, 2023, 49(6): 1551-1561.
- ZHANG J, GAO W B, YAN L, et al. Identification and evaluation of salt-alkali tolerance and screening of salt-alkali tolerant germplasm of oat (*Avena sativa* L.)[J]. *Acta agronomica Sinica*, 2021, 47(9): 1741-1752.
- [33] 李真, 蒲圆圆, 高长斌, 等. 甘蓝型油菜 DH 群体苗期耐湿性的评价[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(2): 286-292.
- LI Z, PU Y Y, GAO C B, et al. Evaluation of waterlogging tolerance in rapeseed (*Brassica napus* L.) DH lines at seedling stage[J]. *Scientia agricultura Sinica*, 2010, 43(2): 286-292.
- [34] 龚政. 不同玉米苗期抗涝性的综合评价[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2022.
- GONG Z. Comprehensive evaluation of waterlogging resistance at seedling stage for various maize (*Zea mays* L.) [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2022.