

236份红花种质资源抗旱性鉴定及综合评价

张云^{1,2}, 侯献飞², 宋贤明², 赵倩³, 于月华¹,
李强², 贾东海², 苗昊翠², 顾元国²

(1.新疆农业大学农学院,新疆乌鲁木齐830000; 2.新疆农业科学院经济作物研究所,新疆乌鲁木齐830091;
3.伊犁师范大学生物科学与技术学院,新疆伊犁835000)

摘要:为筛选红花抗旱性种质资源,确定红花抗旱性鉴定指标和评价方法提供依据,以236份红花种质资源为研究对象,设置正常灌水组(CK)、干旱处理组:全生育期不灌水处理(T1)、于初花期灌水一次处理(T2)。通过测定红花株高、单株产量和籽粒含油率,对其进行抗旱性鉴定、抗旱指标筛选及抗旱性综合评价。结果表明:供试材料间变异系数介于0.158~1.617;抗旱系数的变异系数介于0.118~1.071,抗旱指数的变异系数介于0.131~1.104,通过综合抗旱指数排序,初步将供试材料的抗旱性分为5个等级。定量关系分析表明,干旱胁迫处理1组拟合精度较高($R^2=0.9078$),而干旱胁迫处理2组的拟合精度较低($R^2=0.6235$)。灰色关联分析、主成分和隶属函数分析表明,干旱处理2组的 R^2 平均变异较处理1组的 R^2 提高0.2843。此外,根据抗旱综合评价值进行聚类分析,可将抗旱性划分为五类:分别为强抗旱、抗旱、中抗旱、较敏感性和敏感性抗旱类型,其中强抗旱材料包括‘23A020’、‘23A042’、‘23B035’和‘23H005’等。通过逐步回归分析方程建立综合评价数学模型,干旱处理1组($R^2=0.196$)和处理2组($R^2=0.195$)入选的综合抗旱指标均为株高、株高抗旱指数和产量抗旱指数。研究结果可为红花抗旱种质资源筛选、品种选育及适宜区域推广应用提供理论基础。

关键词:红花;抗旱性;抗旱指标;综合评价

中图分类号:S565.9 **文献标志码:**A

Identification and comprehensive assessment of drought resistance in 236 safflower germplasm resources

ZHANG Yun^{1,2}, HOU Xianfei², SONG Xianming², ZHAO Qian³, YU Yuehua¹,
LI Qiang², JIA Donghai², MIAO Haocui², GU Yuanguo²

(1. College of Agriculture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830000, China;

2. Economic Crop Research Institute, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi, Xinjiang 830091, China;

3. College of Biological Sciences and Technology, Yili Normal University, Yili, Xinjiang 835000, China)

Abstract: This study establishes a foundation for screening drought-resistant safflower germplasm resources and defining the identification criteria and evaluation methods for safflower drought resistance. A total of 236 safflower germplasm resources were studied, and normal irrigation (CK) and drought treatment groups were set up; no irrigation during the whole reproductive period (T1), and one irrigation at the first flowering stage (T2). Safflower plant height, yield per plant and oil content of seeds were measured, and drought resistance was identified, screened and comprehensively evaluated. The results showed that the coefficients of variation among the test materials ranged from 0.158 to 1.617, the coefficients of variation of drought resistance coefficient values ranged from 0.118 to 1.071, and the coefficients of variation of drought resistance index values ranged from 0.131 to 1.104. The drought resistance of the test materials was initially categorized into three grades by the comprehensive drought re-

收稿日期:2024-07-14

修回日期:2024-11-08

基金项目:新疆维吾尔自治区重大科技专项(2022A03004-4)

作者简介:张云(1999-),女,甘肃嘉峪关人,硕士研究生,研究方向为红花遗传育种。E-mail:1125759789@qq.com

通信作者:于月华(1981-),女,新疆博州人,教授,主要从事作物抗逆分子育种研究。E-mail:yuyuehua1213@sina.com

李强(1980-),男,河南郑州人,研究员,主要从事油料作物育种与栽培研究。E-mail:lq19820302@126.com

sistance index ranking. The quantitative relationship analysis showed that the fitting accuracy ($R^2 = 0.9078$) was higher in treatment 1 group, while the fitting accuracy ($R^2 = 0.6235$) was lower in treatment 2 group. Gray correlation analysis, principal component and affiliation function analysis showed that the mean variance of R^2 for treatment 2 group was 0.2843 higher than that of treatment 1 group. Cluster analysis based on the drought resistance comprehensive evaluation values resulted in five categories: strong drought resistant, drought resistant, moderately drought resistant, relatively sensitive and sensitive drought resistant materials. Strong drought resistant materials include '23A020', '23A042', '23B035', and '23H005', etc. A comprehensive evaluation mathematical model was established by stepwise regression analysis equation, and the comprehensive drought tolerance indexes selected for treatment 1 group ($R^2 = 0.196$) and treatment 2 group ($R^2 = 0.195$) were plant height, plant height drought tolerance index and yield drought tolerance index. This study provides a theoretical base for screening drought-resistant safflower germplasm resources, selecting and breeding late-maturing varieties, and promoting their application in suitable regions.

Keywords: safflower; drought tolerance; drought tolerance indicator; comprehensive evaluation

红花 (*Carthamus tinctorius* L.) 为菊科红花属一年生草本植物^[1], 在我国已有两千多年的栽培历史^[1-2]。红花籽油和红花花丝均有较高的经济价值, 其籽粒中具有较高含量的亚油酸, 被赋予“亚油酸之王”的美誉, 且其花丝中富含的类黄酮物质, 被广泛应用于中药学和临床医学。红花在我国分布广泛, 主要集中在新疆、四川、云南、安徽和河南等地种植^[3]。新疆红花种植区域主要集中在塔城地区和昌吉州, 常年种植面积在 $5.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 左右, 占全国红花种植面积和产量的 80% 以上^[3-4], 该区属于典型的干旱和半干旱地区, 年均降水量为 220 mm, 该地区稀少的降水量和季节性干旱气候已成为限制红花产量和品质的重要因素。

近年来, 国内外对红花的研究主要集中在遗传多样性分析^[5]、组织培养^[6]、色素提取^[7-8]、药用物质提取及测试分析^[9-10]、临床医学作用^[11-12] 等方面, 而针对其抗旱性的研究报道较少。在有关作物抗旱性品种鉴定方法及指标筛选研究方面, 前人对大豆^[13]、油菜^[14]、棉花^[15]、高粱^[16] 已进行了大量研究。前人研究表明, 作物的株高、粒重和生物量等相关性状与籽粒产量呈显著相关关系, 这些性状通常被认为是抗旱性的评价参数^[17-18]。前人为避免研究作物抗旱性单一、片面或相互重叠等问题, 主要采用隶属函数法、主成分分析、聚类分析、灰色关联分析等方法, 或利用多指标综合筛选、鉴定和评价的方法来筛选出最佳抗旱评价结果^[19-20]。目前, 对红花抗旱性的鉴定主要以红花萌发期和苗期的形态指标、生理生化指标、生长发育指标、内源激素指标为研究对象, 多采用温室盆栽和高渗溶液干旱模拟等方法对其进行抗旱性鉴定和等级划分^[21-22], 而针对红花成株期的抗旱性鉴定评价及指标筛选却鲜有报道。因此, 本研究进行田间试验, 设置正

常灌水组 (CK), 干旱处理组: 全生育期不灌水处理 (T1)、初花期灌水一次处理 (T2), 共计三个处理, 利用综合评价法对 236 份红花种质资源的株高、单株产量、籽粒含油率进行鉴定与评价。通过主成分分析法、隶属函数法及灰色关联度方法相结合将两种干旱处理组测定指标进行综合分析, 构建产量抗旱指数估算模型, 并对供试材料进行聚类, 以评估红花的抗旱能力, 旨在为不同红花品种抗旱种质资源鉴定、筛选及品种优化布局提供理论依据和技术支撑, 同时为后期开展红花抗旱品种选育和抗旱机制等方面的研究奠定基础。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本试验供试的 236 份红花种质资源均为自然杂交群体材料, 经多年多代纯化选育收集获得, 现保存于国家种质资源库新疆分库中。供试种子均由新疆农业科学院经济作物研究所提供, 在位于乌鲁木齐市的新疆农业科学院安宁渠综合试验场进行播种。供试种子中有国内材料 178 份, 其中新疆 (包括新疆塔城) 93 份, 甘肃 16 份, 河南 23 份, 江苏 16 份, 山东 9 份, 青海 7 份, 河北 2 份, 宁夏 2 份, 安徽 10 份; 国外引进材料 58 份, 其中印度 27 份, 美国 11 份, 巴基斯坦 5 份, 阿富汗 3 份, 澳大利亚 4 份, 土耳其 2 份、伊朗 2 份、以色列 2 份, 埃及 1 份, 墨西哥 1 份。供试材料名称、编号及来源略。

1.2 试验设计

于 2022—2023 年在新疆农业科学院安宁渠综合试验场进行田间试验 ($43^\circ 57' \text{N}$, $87^\circ 29' \text{E}$)。试验地属于温带大陆性气候, 年平均气温 7.3°C , 全年大于 0°C 积温 $4\,370.4^\circ \text{C}$, 全年大于 10°C 积温为 $4\,063.1^\circ \text{C}$, 年降水量 $180 \sim 220 \text{ mm}$, 年日照时数

2 771.8 h,无霜期 174 d,适合红花的种植和生长。试验地干旱胁迫处理下,干旱胁迫处理 1 组、干旱胁迫处理 2 组、对照组在 0~60 cm 土层土壤平均持水量分别为 9.70、14.20、16.16 g·cm⁻³(表 1)。

试验地的前茬作物为油菜,试验地土壤为灰漠土,土壤肥力中等、均匀。播种前施 1.2×10⁴ kg·hm⁻²有机肥及 450 kg·hm⁻²(NH₄)₂HPO₄用作底肥,土壤全氮、全磷、全钾、有机质含量分别为 1.24、1.76、8.23、14.58 g·cm⁻³,pH 值为 6.34。采取常规田间管理,随机区组设计,设置 3 个处理,T1:干旱胁迫处理 1 组,全生育期不灌水;T2:干旱胁迫处理 2 组,全生育期灌水一次(初花期,灌水量为 375 m³·hm⁻²);CK:对照组,正常灌水(全生育期灌水 4 次,灌水量共计 1 500 m³·hm⁻²),每个处理 3 次重复,试验小区长 2 m,宽 3 m,小区面积为 6 m²,供试材料每份播种 4 行,行距 20 cm,行长 2 m,有效播种数为 40 株,株距 20 cm。地膜采用普通聚乙烯地膜覆盖,地表覆盖度约为 80%。采用膜下滴灌(每次灌水量为 375 m³·hm⁻²),随水追肥,可保证每小区都能够精确控制灌水量与施肥量。

表 1 干旱处理下田间持水量/(g·cm⁻³)

Table 1 Field water holding capacity under drought stress			
土层深度 Soil depth /cm	干旱胁迫处理 1 组 Drought stress treatment group 1	干旱胁迫处理 2 组 Drought stress treatment group 2	对照组 CK
0~20	7.83	12.31	17.71
20~40	10.66	14.52	16.68
40~60	10.37	12.74	15.16
60~80	9.95	17.23	15.07
平均值 Mean	9.70	14.20	16.16

1.3 测定项目及方法

于成熟期收获前 2 天从每小区随机拔取 10 株红花,量取其株高。于成熟期收获,人工脱粒后统计单株籽粒单株产量。利用近红外分析仪(FOSS-NIR^{TSD}S2500F),检测籽粒含油率。对测定各项指标数据进行处理,计算抗旱系数、抗旱指数、综合抗旱指数、隶属函数值和抗旱性度量值分析公式如下:

抗旱系数(DC):

$$DC = \frac{X_d}{X_w} \tag{1}$$

抗旱指数(DI):

$$DI = \frac{X_d}{\bar{X}}DC \tag{2}$$

综合抗旱指数(CDI):

$$CDI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n DI \tag{3}$$

隶属函数($\mu(x)$):

$$\mu(x) = \frac{DI - DI_{\min}}{DI_{\max} - DI_{\min}} \tag{4}$$

主成分权重(W_j):

$$W_j = r_i / \sum_{i=1}^n |r_i| \tag{5}$$

抗旱性度量值(D):

$$D = \sum_{i=1}^n [\mu(x) \times W_j] \tag{6}$$

灰色关联度:

$$ri = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k)$$
$$X'_i(k) = [X_i(k) - \bar{X}_i] / S_i \tag{7}$$

关联系数:

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|}{|X_0(k) - X_i(k)| + \rho \max_i \max_k |X_0(k) - X_i(k)|} \tag{8}$$

综合抗旱评价值(SD):对红花各测定指标的抗旱性度量值(D)进一步求和得到。

式中, X_d 和 X_w 分别为干旱胁迫和对照下各材料各指标测定值; $\bar{X}$ 为该指标在干旱胁迫下的平均值; $DI_{\min}$ 和 $DI_{\max}$ 分别为各性状抗旱系数的最小值和最大值; r_i 为第 i 个综合指标贡献率; n 为主成分的数目; W_j 表示第 j 个主成分的权重。 $X'_i(k)$ 、 $X_i(k)$ 、 $\bar{X}_i$ 和 ξ_i 分别为数据无量纲处理后的结果、各材料各指标的干旱胁迫下的测定值、同一指标的平均值和标准差; ρ 为分辨系数,取值为 0.5。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2021 整理数据、R studio 4.3.1进行统计分析和作图。

2 结果与分析

2.1 红花种质各性状指标测定值分析

干旱胁迫对供试种质资源各指标测定值均有显著影响,处理间和种质材料间的差异均达到显著水平(表 2、3)。供试材料间变异系数介于 0.158~1.617,说明本试验所选用的红花种质材料类型丰富,具有较好的地域代表性,干旱胁迫处理效果好,各供试材料所选指标对干旱胁迫反应的敏感性有不同程度的差异变化;另外,供试红花种质材料各指标在对照和干旱胁迫处理下的测定值之间的相关系数介于 0.005~0.772,这进一步说明各指标对干旱胁迫反应的敏感性存在差异,单独采用某一指标测定值很难鉴定评估供试红花种质资源的抗旱性。

表 2 干旱胁迫处理 1 组 (T1) 和对照组 (CK) 下
供试红花种质各测定指标平均值差异分析

Table 2 Difference analysis of the mean values of the tested
safflower germplasm under drought stress treatment
group 1 (T1) and control group (CK)

项目 Item	株高/cm Plant height		单株产量/g Yield per plant		籽粒含油率/% Oil content	
	CK	T1	CK	T1	CK	T1
平均数 Mean	66.20	63.10	28.00	17.30	26.30	26.60
变异系数 CV/%	19.20	20.10	51.80	161.70	15.80	17.20
标准误 SE	0.74		3.35		0.37	
<i>t</i>	4.20		4.20		1.47	
<i>P</i>	0.037 *		0.029 *		0.044 *	
相关系数 <i>r</i>	0.562		0.005		0.008	
Correlation coefficient						

注: * 表示在 $P<0.05$ 水平差异显著,下同。
Note: * indicates the significant difference at the $P<0.05$ level.
The same below.

表 3 干旱胁迫处理 2 组和对照组 (CK) 下
供试红花种质各测定指标平均值差异分析

Table 3 Difference analysis of mean values of tested
safflower germplasm under drought stress treatment
group 2 (T2) and control group (CK)

项目 Item	株高/cm Plant height		单株产量/g Yield per plant		籽粒含油率/% Oil content	
	CK	T2	CK	T2	CK	T2
平均数 Mean	66.20	69.20	28.00	25.00	26.30	26.70
变异系数 CV/%	19.20	20.40	51.80	49.70	15.80	17.20
标准误 SE	0.53		3.39		0.18	
<i>t</i>	6.35		1.78		0.77	
<i>P</i>	0.036 *		0.037 *		0.043 *	
相关系数 <i>r</i>	0.772		0.007		0.161	
Correlation coefficient						

2.2 抗旱系数和抗旱指数指标统计分析

与正常灌水处理相比,供试红花种质资源在受到两种干旱胁迫处理后,各指标均发生不同程度变化。同一个指标各种质资源的抗旱系数和抗旱指数存在明显差异,抗旱系数的变异系数介于 0.118~1.071,抗旱指数的变异系数介于 0.131~1.104,不同种质资源间抗旱系数和抗旱指数所反映的抗旱性不同,且同一种质资源各指标的抗旱系数和抗旱指数差异较大,说明各指标对于干旱胁迫所反应的敏感性不同。

此外,同一区间各指标抗旱系数和抗旱指数的分布次数与频率存在较大差异(表 4,5)。各指标的抗旱指数分布次数和频率结果表明,在 T1 处理下,

236 份红花种质资源中, $DC\geq 0.9$ 的株高、单株产量和籽粒含油率的分布频率分别为 88%、57%和 76%,各指标对于干旱胁迫反应的敏感程度从高到低依次为单株产量、籽粒含油率、株高。在 T2 处理下, $DC\geq 0.9$ 的种质资源数的株高、单株产量和籽粒含油率的占试验所选取的种植资源总数的频率分别为 92%、55%和 75%,各指标对于干旱胁迫反应的敏感程度从高到低依次为单株产量、籽粒含油率、株高。对各指标的抗旱指数分布次数和频率结果分析可知,T1 处理 $DI\geq 0.9$ 的株高、单株产量和籽粒含油率分布频率分别为 69%、62%和 75%,各指标对于干旱胁迫反应的敏感程度依次为籽粒含油率、株高、单株产量。T2 处理 $DI\geq 0.9$ 的分布频率只有籽粒含油率(76%),而株高和单株产量抗旱指数的分布频率均小于 0.9。以上结果表明,不同干旱胁迫处理下得到的不同种质资源的抗旱指数得出结果存在差异,直接采用该指标会由于指标间信息的叠加,很难准确客观地评价各种质资源的抗旱性。

2.3 综合抗旱指数统计分析

通过公式(1)~(3)计算出各材料的综合抗旱指数,根据综合抗旱指数排序,初步将 236 份材料的抗旱性分为 5 组,在 T1 处理下:编号 23A001、23B001、23H003 和 23TY002 等 94 份材料为强抗旱材料,编号 23A003、23B082、23H007 和 23TY020 等 40 份材料为抗旱性材料,编号 23A005、23B031、23H035、23TY033 等 45 材料为中抗旱性材料,编号 23A024、23B011、23H040 和 23TY005 等 31 份为较敏感材料,编号 23A023、23B010、23H059、23TY009 等 26 份为敏感材料。在 T2 处理下:编号 23A007、23B003、23H006 和 23TY019 等 126 份材料为强抗旱材料,编号 23A002、23B029、23H054 和 23TY011 等 62 份材料为抗旱性材料,编号 23A048、23B060、23H022、23TY035 等 38 材料为中抗旱性材料,编号 23A029、23B064、23H018 和 23TY021 等 7 份为较敏感材料,敏感材料仅有 3 份材料,为编号 23A040、23H019、23TY039。表明红花不同性状对于干旱压力的敏感度各不相同;在同一种材料中,不同指标的单一抗旱系数和抗旱指数也存在差异。

2.4 各测定指标的抗旱综合评价

对两组不同干旱处理下各供试红花测定指标进行隶属函数计算得到抗旱性度量 D 值(图 1)。两组不同干旱处理下的红花株高和单株产量的抗旱性度量 D 值变化范围均较大,其中 T1 处理下红花的株高和单株产量 D 值范围分别为 0.132~0.260 和

表 4 供试红花种质各测定指标抗旱系数 (DC) 在不同区间的分布

Table 4 Distribution of the drought resistance coefficient of the tested safflower germplasm in different intervals															
处理 Treatment	指标 Parameter	0.3≤ DC <0.6		0.6≤ DC <0.9		0.9≤ DC <1.2		1.2≤ DC <1.5		1.5≤ DC <1.8		1.8≤ DC <2.1		2.1≤ DC	
		次数 Time	频率 Frequency	次数 Time	频率 Frequency	次数 Time	频率 Frequency	次数 Time	频率 Frequency	次数 Time	频率 Frequency	次数 Time	频率 Frequency	次数 Time	频率 Frequency
T1	株高 Plant height	0	0.00	22	0.09	181	0.77	26	0.11	0	0.00	0	0.00	0	0.00
	单株产量 Yield per plant	38	0.16	67	0.28	61	0.26	28	0.12	18	0.08	6	0.03	18	0.08
	籽粒含油率 Oil content	4	0.02	54	0.23	138	0.58	30	0.13	7	0.03	2	0.01	2	0.01
T2	株高 Plant height	0	0.00	29	0.12	173	0.73	44	0.19	0	0.00	0	0.00	0	0.01
	单株产量 Yield per plant	34	0.14	60	0.25	60	0.25	36	0.15	18	0.08	14	0.06	20	0.01
	籽粒含油率 Oil content	4	0.02	55	0.23	137	0.58	30	0.13	7	0.03	1	0.00	2	0.01

表 5 供试红花种质各测定指标抗旱指数 (DI) 在不同区间的分布

Table 5 Distribution of drought resistance index of the tested safflower germplasm in different intervals															
处理 Treatment	指标 Parameter	0.3≤ DI <0.6		0.6≤ DI <0.9		0.9≤ DI <1.2		1.2≤ DI <1.5		1.5≤ DI <1.8		1.8≤ DI <2.1		2.1≤ DI	
		次数 Time	频率 Frequency	次数 Time	频率 Frequency	次数 Time	频率 Frequency	次数 Time	频率 Frequency	次数 Time	频率 Frequency	次数 Time	频率 Frequency	次数 Time	频率 Frequency
T1	株高 Plant height	5	0.02	68	0.29	139	0.59	24	0.10	0	0.00	0	0.00	0	0.00
	单株产量 Yield per plant	34	0.14	61	0.26	55	0.23	36	0.15	17	0.07	21	0.09	19	0.08
	籽粒含油率 Oil content	3	0.01	51	0.22	137	0.58	30	0.13	7	0.03	1	0.00	2	0.01
T2	株高 Plant height	194	0.82	42	0.18	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
	单株产量 Yield per plant	213	0.90	25	0.11	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
	籽粒含油率 Oil content	3	0.01	55	0.23	139	0.59	30	0.13	7	0.03	1	0.00	2	0.01

0.116~0.229,T2 处理下红花的株高和单株产量 D 值范围分别为 0.124~0.242 和 0.122~0.241。T1 和 T2 处理的红花籽粒含油率的抗旱性度量 D 值变化范围较小,分别为 0.103~0.152 和 0.059~0.117。各处理下各指标的平均 D 值表现为 T1 处理株高>T2 处理单株产量>T2 处理株高>T1 处理单株产量>T2 处理籽粒含油率>T1 处理籽粒含油率。

通过进一步分析两组干旱处理下各测定指标的抗旱综合评价值 (SD) 与单株产量抗旱指数 ($YDRI$)间定量关系发现(图 2),T1 处理的抗旱综合评价值 (SD) 与 $YDRI$ 间线性决定系数 R^2 为

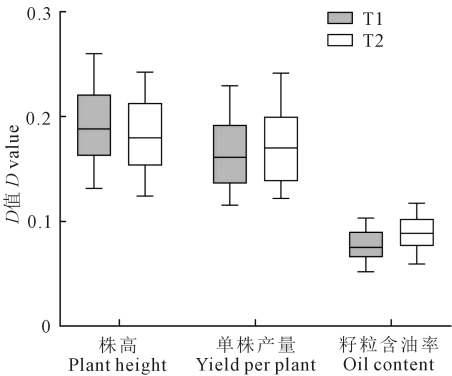
0.9078,T2 处理的抗旱综合评价值 (SD) 与 $YDRI$ 间线性决定系数 R^2 为 0.6235,T1 处理的综合抗旱评价值 (SD)的 R^2 较 T2 处理提高 0.2843。这表明,在不同干旱胁迫处理下,供试红花种质表现出的抗旱能力差异较大,因此需要将两组干旱处理中各项测定指标的抗旱性进行综合评估。

2.5 各测定指标的灰色关联分析

根据式(6)和式(8)计算两组不同干旱处理的所有供试材料的抗旱综合评价值 (SD),范围分别为 0.421~0.689 和 0.374~1.444,并对各测定指标与抗旱综合评价 SD 值进行灰色关联度分析(表 6、7)。

以各测定指标值为比较序列, SD 值为参考序列进行灰色关联度分析, 获得各测定指标值与 SD 值间的关联度 $X'_i(k)$ 。关联度大小反映了测定指标与综合 SD 值的密切程度, 其中 T1 处理各测定指标的关联度均大于 0.9, 范围介于 0.901~0.974, 而 T2 处理各测定指标的关联度范围为 0.700~0.966。此外, 同一测定指标在不同干旱处理下的排序差别较大, 株高在 T1 处理中的排序位次为 3, 而在 T2 处理中的排序位次为 8; 籽粒含油率在 T1 处理中的排序位次最高(0.974), 而在 T2 处理的排序位次为 5; 单株产量在两组干旱处理下的关联度位次均在后两位, 而在 T2 中单株产量的关联度最低(0.700)。

为更好地利用单个指标对综合抗旱性的贡献, 根据各测定指标灰色关联度的排序情况, 以及两组



注: 箱形图中横行代表中位数。
Note: The horizontal rows in the box plot represent the medians.

图 1 供试红花各测定指标不同干旱处理下的综合抗旱性度量 D 值的变化。

Fig.1 Change of comprehensive drought resistance measure D under different drought treatments

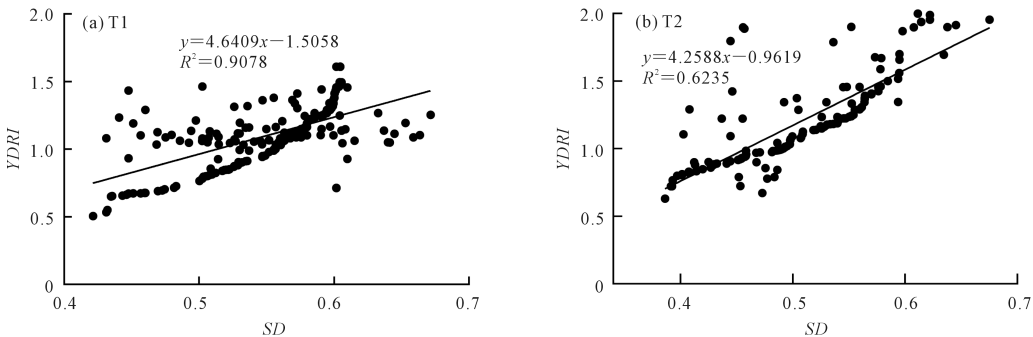


图 2 供试红花各测定指标不同干旱处理下的综合抗旱性 SD 值与单株产量抗旱指数的变化关系

Fig.2 Relationship between comprehensive drought resistance SD and each plant yield under different drought treatments

表 6 T1 处理供试红花种质各测定指标与综合 D 值的灰色关联度

Table 6 Gray correlation of the measured indicators and comprehensive D values of the tested safflower germplasm in T1

关联指标 Correlation indicator	关联度 Correlation degree	位次 Ranking
籽粒含油率 Oil content	0.974	1
单株产量抗旱指数 Drought resistance index of yield per plant (DI)	0.963	2
株高 Plant height	0.960	3
单株产量抗旱系数 Drought resistance coefficient of yield per plant (DC)	0.952	4
株高抗旱系数 Drought resistance coefficient of plant height (DC)	0.945	5
籽粒含油率抗旱系数 Drought resistance coefficient of oil content (DC)	0.924	6
籽粒含油率抗旱指数 Drought resistance index of oil content (DI)	0.923	7
单株产量 Yield per plant	0.915	8
株高抗旱指数 Drought resistance index of plant height (DI)	0.901	9

表 7 T2 处理供试红花种质各测定指标与综合 D 值的灰色关联度

Table 7 Gray correlation of each indicators and comprehensive D values of the tested safflower germplasm in T2

关联指标 Correlation indicator	关联度 Correlation degree	位次 Ranking
株高抗旱指数 Drought resistance index of plant height (DI)	0.966	1
单株产量抗旱指数 Drought resistance index of yield per plant (DI)	0.953	2
株高抗旱系数 Drought resistance coefficient of plant height (DC)	0.951	3
单株产量抗旱系数 Drought resistance coefficient of yield per plant (DC)	0.939	4
籽粒含油率 Oil content	0.936	5
籽粒含油率抗旱系数 Drought resistance coefficient of oil content (DC)	0.865	6
籽粒含油率抗旱指数 Drought resistance index of oil content (DI)	0.864	7
株高 Plant height	0.857	8
单株产量 Yield per plant	0.700	9

不同干旱处理测定指标的抗旱综合评价值 (SD) 与单株产量抗旱指数 ($YDRI$) 进行线性决定系数作图 (图 3)。T1 处理的抗旱综合评价 SD 值与 $YDRI$ 间线性决定系数 R^2 最高 (0.711), T2 处理的抗旱综合评价 SD 值与 $YDRI$ 间线性决定系数 R^2 最低 (0.248), 其他剩余测定指标 R^2 居中。这也说明了供试红花种质在不同干旱胁迫处理下表现的抗旱性存在较大差异, 还需将两组干旱胁迫处理下各测定指标的抗旱性进行综合评价。

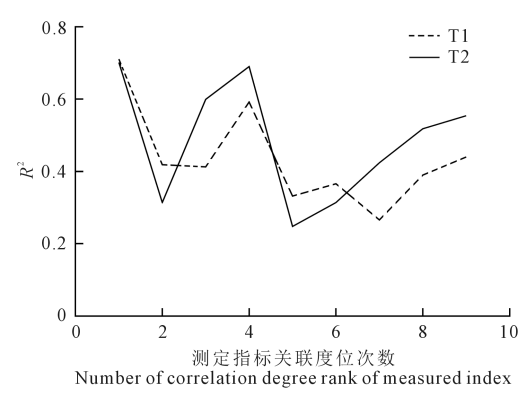


图 3 不同测定指标的抗旱性度量 D 值与单株产量抗旱指数间线性决定系数

Fig.3 Linear coefficient of determination between D value of different measurement indexes and drought resistance index of single plant yield

2.6 各测定指标的主成分和隶属函数分析

将干旱不同处理的各性状和测定指标进行主成分分析, 根据特征值大于 1 原则, 提取出 4 个主成分。两组不同干旱处理的供试材料各测定指标的主成分 4 的累计贡献率分别达到 76.435% 和 74.722% (表 8、9), 这包含了原始指标所携带的大部分信息, 代表性较强。根据式 (4) 和 (5) 获得各成分的隶属函数值 $\mu(x)$ 及其对应权重, 可将原来各指标换成这 4 个新的互相独立的综合指标 (分别以 PC1、PC2、PC3 和 PC4 表示)。T1 处理, PC1 在籽粒含油率抗旱系数中最高主成分为 0.961; PC2 在株高上最高主成分为 0.721; PC3 在单株产量抗旱系数上最高主成分为 0.806; PC4 在株高抗旱指数上最高主成分为 0.942, 累计贡献率达到 76.435%。T2 处理, PC1 在籽粒含油率抗旱系数和抗旱指数上均最高主成分为 0.962; PC2 在单株产量上最高主成分为 0.819; PC3 在单株产量抗旱系数上最高主成分为 0.783; PC4 在株高抗旱指数上最高主成分为 0.968, 累计贡献率达到 74.722%。

采用 K-means 法对 SD 值进行聚类分析, 将两组干旱处理下的 236 份红花种质资源划分为五类,

分别为强抗旱 ($SD \geq 0.59$)、抗旱 ($0.51 \leq SD < 0.59$)、中抗旱 ($0.45 \leq SD < 0.51$)、较敏感性 ($0.41 \leq SD < 0.45$) 和敏感性 ($SD < 0.41$)。其中, 在 T1 处理中, 第一大类 (I) 属于强抗旱类别包括 23A020、23B034 和 23H047 等 15 份材料; 第二大类 (II) 属于抗旱类别, 包括 23A048、23B058、23H039 等 35 份材料; 第三大类 (III) 属于中抗旱类别, 包括 23TY009、23B066、23H057 等 134 份材料; 第四大类 (IV) 属于较敏感类别, 包括 23TY025、23B026、23H038 等 34 份材料; 第五大类 (V) 属于敏感类别, 包括 23B024、23A039、23A045 等 11 份材料 (图 4)。

在 T2 处理中, 第一大类 (I) 属于强抗旱类别包括 23A042、23H005、23TY017 等 11 份材料; 第二大类 (II) 属于抗旱类别, 包括 23A020、23A035、23B028 等 43 份材料; 第三大类 (III) 属于中抗旱类别, 包括 23A010、23B056、23TY012 等 72 份材料; 第四大类 (IV) 属于较敏感类别, 包括 23TY010、23H055、23H039 等 49 份材料; 第五大类 (V) 属于敏感类别, 包括 23B001、23B055、23B069 等 14 份材料 (图 5)。

2.7 抗旱性评价指标的筛选

为明确两组不同干旱处理下综合评价 SD 值与 236 份红花种质资源各测定指标之间的关系, 建立可用于精确评价抗旱性的数学模型, 以 SD 值作为因变量, 各测定指标为自变量, 进行逐步回归分析, T1 处理的回归方程为: $MD = 0.411 + 0.243X_7 - 0.006X_5 + 0.001X_1$ ($R^2 = 0.195, P < 0.05$), T2 处理的回归方程为 $MD = 0.188 + 0.369X_7 + 0.135X_5 + 0.001X_1$ ($R^2 = 0.196, P < 0.05$)。入选的 3 个性状参数分别为: 单株产量抗旱指数 (X_7)、株高抗旱指数 (X_5) 和株高 (X_1), 这些参数可作为筛选抗旱性种质资源的鉴定指标。通过这些指标确立的抗旱综合指数可以对供试材料进行分类, 为种质抗旱鉴定分级提供直接依据, 同时利用抗旱综合预测模型可以较好地评价红花种质资源的抗旱能力。

3 讨 论

3.1 干旱对作物种质资源的影响

全球气候变暖导致干旱事件频发且强度增加, 进而对农业生产和作物生长产生恶劣影响。干旱导致作物生长周期紊乱^[23], 减缓作物生长, 影响器官发育和产量形成。此外还会导致作物将生物量向根部转移, 增加根的数量和长度, 但同时减缓了植株生长速度, 叶片数量减少, 光合作用降低, 最终减少作物产量^[24]。在干旱初期, 植物可通过降低株高、细胞含水量和叶绿素含量来应对水分缺失, 其

可作为抗旱性指标。随着干旱加剧,植物生长受限,叶绿素缺失,植物自身会积累渗透调节物质以减少水分流失^[25-27]。

3.2 红花种质资源抗旱性评价方法的选择

作物对干旱的反应相差各异^[28],抗旱性评估指标在不同作物间也存在差异。为了准确评估作物的抗旱能力,必须挑选合适的指标并采用恰当的方法,同时结合多种评估方法。针对抗旱评价方法的研究,前人已在小麦^[29]、大麦^[30]、番茄^[31]、藜麦^[32]等不同种质资源中有相关报道。前人大多数采用隶属函数和权重分析方法筛选抗旱种质资源,而没有综合考虑各测定指标对干旱胁迫的干旱胁迫下抗旱和敏感程度。因此,本研究通过综合抗旱指数(*CDI*)、抗旱性度量 *D* 值和综合抗旱评价值(*SD*)等评价指标,结合频率、主成分、灰色关联度和聚类分析方法,采用逐步线性回归模型对红花种质资源的抗旱性进行评价。通过归一化和标准化处理,消除不同测定指标单位的影响,并利用变异系数确定各指标在抗旱评价中的权重。结果显示,供试材料的抗旱指数与抗旱指数(*CDI*)、抗旱性度量 *D* 值和综

合抗旱评价值(*SD*)呈显著正相关关系,表明综合利用各测定指标可有效简化红花资源抗旱性鉴定方法。

前人对作物抗旱性鉴定研究方法多为针对作物前期或单一生育时期的抗旱性。如魏波等^[33-34]利用 PEG-6000 进行干旱胁迫模拟,研究不同类型红花品种(系)苗期生理生化特性的影响,且采用不同浓度 PEG-6000 模拟干旱胁迫处理,研究红花苗期抗旱性的最佳模拟条件;王沛琦等^[35]利用主成分分析隶属函数法针对药用型红花苗期进行抗旱性研究。主成分分析和隶属函数法简便快捷,已在众多作物抗旱研究中有广泛报道,但缺乏对测定指标的综合利用和评价。

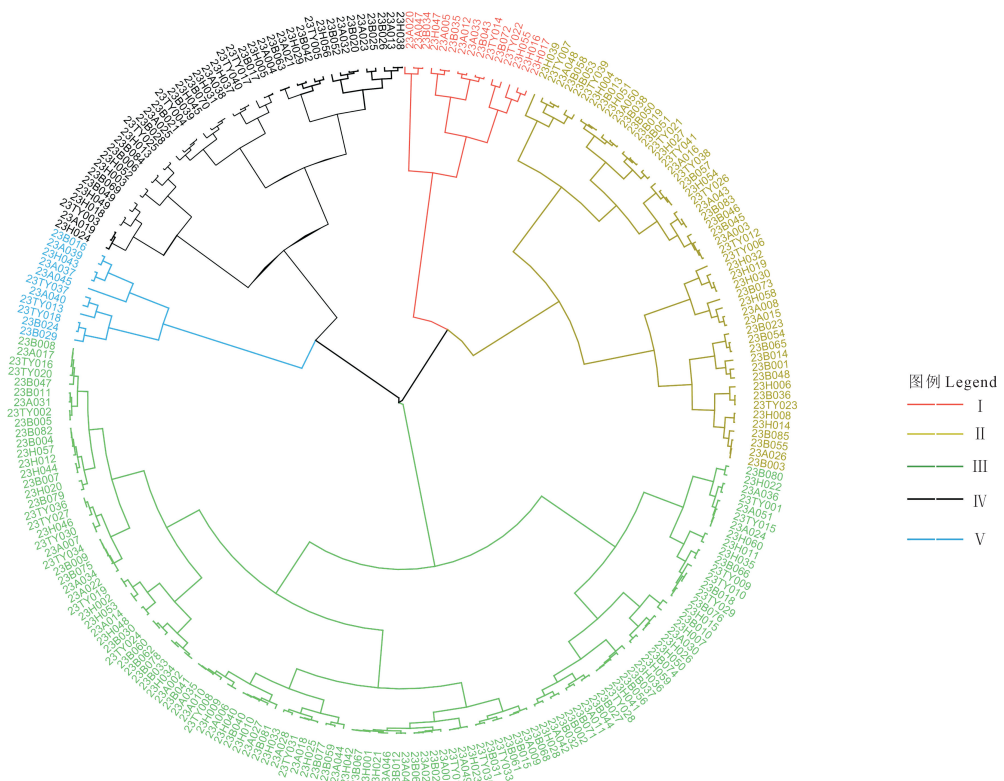
本研究运用主成分分析和隶属函数方法,对单株产量抗旱指数(*YDRI*)与抗旱性综合评价值(*SD*)进行相关性分析。为整合不同时期的抗旱性信息,本研究还采用灰色关联分析,构建了抗旱评价体系,将两组不同干旱处理下的测定指标与综合抗旱性评价值(*SD*)相结合,并与单株产量抗旱指数(*YDRI*)进行相关分析。分析结果表明,T1 处理的平均变异较 T2 处理提高0.4834。这表明,通过综合

表 8 干旱胁迫处理 1 组供试红花各测定指标的主成分分析
Table 8 Principal component analysis of the measured indicators in drought stress treatment group 1

性状 Trait	主成分 Principal component			
	PC1	PC2	PC3	PC4
株高 Plant height	0.173	0.721	-0.253	0.145
籽粒含油率 Oil content	0.799	-0.028	0.087	0.006
单株产量 Yield per plant	0.110	0.819	-0.302	0.097
株高抗旱系数 Drought resistance coefficient of plant height(<i>DC</i>)	-0.109	0.643	-0.122	-0.266
株高抗旱指数 Drought resistance index of plant height(<i>DI</i>)	0.008	-0.090	-0.154	0.942
单株产量抗旱系数 Drought resistance coefficient of yield per plant(<i>DC</i>)	-0.049	0.307	0.806	0.148
单株产量抗旱系数 Drought resistance coefficient of yield per plant(<i>DC</i>)	-0.116	0.318	0.798	0.079
籽粒含油率抗旱指数 Drought resistance index of oil content(<i>DI</i>)	0.960	-0.043	0.067	-0.033
籽粒含油率抗旱系数 Drought resistance coefficient of oil content(<i>DC</i>)	0.961	-0.029	0.065	-0.030
特征值 Eigenvalue	2.553	1.811	1.496	1.019
贡献率 Contribution rate/%	28.369	20.117	16.624	11.324
累计贡献率 Cumulative contribution/%	28.369	48.486	65.111	76.435
权重 Index weight	0.371	0.263	0.217	0.148

表 9 干旱胁迫处理 2 组供试红花各测定指标的主成分分析
Table 9 Principal component analysis of the measured indicators in drought stress treatment group 2

性状 Trait	主成分 Principal component			
	PC1	PC2	PC3	PC4
株高 Plant height	0.055	0.786	0.218	-0.071
籽粒含油率 Oil content	0.798	-0.082	0.045	0.109
单株产量 Yield per plant	0.111	0.699	0.226	-0.178
株高抗旱系数 Drought resistance coefficient of plant height(<i>DC</i>)	-0.007	0.596	0.328	0.033
株高抗旱指数 Drought resistance index of plant height(<i>DI</i>)	-0.013	0.180	0.013	0.968
单株产量抗旱系数 Drought resistance coefficient of yield per plant(<i>DC</i>)	-0.105	-0.345	0.780	-0.105
单株产量抗旱系数 Drought resistance coefficient of yield per plant(<i>DC</i>)	-0.157	-0.312	0.783	0.144
籽粒含油率抗旱指数 Drought resistance index of oil content(<i>DI</i>)	0.962	-0.073	0.071	-0.020
籽粒含油率抗旱系数 Drought resistance coefficient of oil content(<i>DC</i>)	0.962	-0.067	0.070	-0.021
特征值 Eigenvalue	2.539	1.727	1.441	1.018
贡献率 Contribution rate/%	28.209	19.190	16.009	11.314
累计贡献率 Cumulative contribution/%	28.209	47.399	63.408	74.722
权重 Index weight	0.378	0.257	0.214	0.151



注:I、II、III、IV、V 分别表示强抗旱材料、抗旱材料、中抗旱材料、较敏感材料和敏感材料,下同。

Note: I, II, III, IV, and V represent strong drought resistant materials, drought resistant materials, moderately drought resistant materials, relatively sensitive materials, and sensitive materials, respectively. The same below.

图 4 T1 处理综合抗旱性评价(SD)聚类图

Fig.4 Comprehensive drought tolerance rating value (SD) clusters in T1

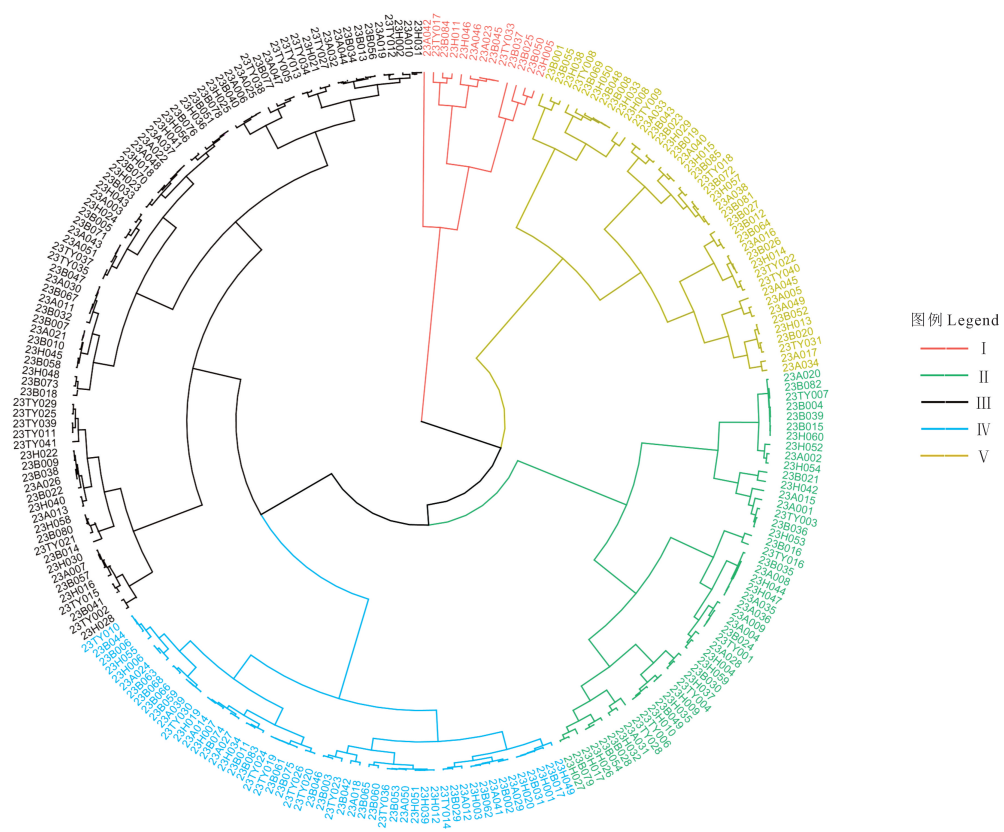


图 5 T2 处理综合抗旱性评价(SD)聚类图

Fig.5 Comprehensive drought tolerance rating value (SD) clusters in T2

考虑不同干旱处理下的测定指标与抗旱评价的相关性,可以准确预测红花单株产量抗旱指数,可为红花品种的选育工作提供有价值的参考依据。

3.3 红花种质资源抗旱性指标的筛选

准确评估作物抗旱性需选择合适的评价指标和方法。作物抗旱性涉及多个农艺性状,也是基因型与环境相互作用的结果。筛选出反映抗旱性的关键指标有助于鉴定和培育抗旱品种。尽管已有研究针对不同作物筛选出不同的抗旱指标,但关于红花抗旱性的研究较少,且主要集中在萌发期和苗期,对红花成熟期抗旱性的研究不足。本研究发现,红花在成熟期的株高、单株产量和籽粒含油率在不同干旱条件下的变异较大,表明这些指标能反映红花对干旱的应激和响应能力。为精确鉴定红花的抗旱性,本研究构建了一个综合评价指标体系以提高鉴定的可靠性和适应性。

针对红花种质资源成熟期的抗旱性,本研究选取了红花 3 个主要性状进行分析,通过 9 个测定指标和不同评价方法,发现这些指标受干旱影响程度不一且相互关联,直接使用这些指标评价抗旱性不够准确。因此利用主成分分析简化评价过程,并通过灰色关联度分析确定了各指标与抗旱综合评价的相关性:T1 处理下,籽粒含油率、单株产量抗旱指数、株高、单株产量抗旱系数、株高抗旱系数、籽粒含油率抗旱系数、籽粒含油率抗旱指数、单株产量、株高抗旱指数、穗粒数和千粒重;T2 处理下,株高抗旱指数、单株产量抗旱指数、株高抗旱系数、单株产量抗旱系数、籽粒含油率、籽粒含油率抗旱系数、籽粒含油率抗旱指数、株高、单株产量,这与各指标对干旱胁迫反应的敏感性及各指标与的密切程度基本吻合,提升抗旱评估的精确度与完整性。回归分析结果表明,这些指标与抗旱性度量值呈正相关关系。因此,有针对性地测定相关指标能有效鉴定红花种质资源的抗旱性,简化鉴定工作。

4 结 论

本研究通过田间试验对 236 份红花种质资源进行了抗旱性筛选,采用两种不同的干旱胁迫处理方法进行综合评价。研究确定红花成熟期抗旱性综合评价价值,并通过聚类分析选出强抗旱类型材料 23A020、23A042、23B035 和 23H005 等。同时通过逐步线性回归方程建立数学模型,进一步确定抗旱性综合评价价值,分析结果表明株高、株高抗旱指数和单株产量抗旱指数是关键参数。

参 考 文 献:

- [1] 王兆木. 世界红花种质资源评价与利用[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993.
WANG Z M. Evaluation and utilization of safflower germplasm resources in the world[M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 1993.
- [2] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 一部[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020.
Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China volume 1 [M]. Beijing: China Medical Science Press, 2020.
- [3] 侯献飞, 卢敏, 梁鸿, 等. 油药兼用红花种质资源生长发育及光合特性分析[J]. 新疆农业科学, 2022, 59(6): 1356-1372.
HOU X F, LU M, LIANG H, et al. Analysis on growth and photosynthetic characteristics of oil and medicine safflower (*Carthamus tinctorius* L.) germplasm resources in Xinjiang[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2022, 59(6): 1356-1372.
- [4] 侯献飞, 张云, 刘雨馨, 等. 基于主要农艺性状的 686 份红花种质资源遗传多样性分析[J]. 植物遗传资源学报, 2024, 25(9): 1468-1479.
HOU X F, ZHANG Y, LIU Y X, et al. Genetic diversity analysis of 686 safflower (*Carthamus tinctorius* L.) germplasm accessions based on agronomic traits [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2024, 25(9): 1468-1479.
- [5] AHMADI A J, AHMADIKHAH A. Occurrence of simple sequence repeats in cDNA sequences of safflower (*Carthamus tinctorius*) reveals the importance of SSR-containing genes for cell biology and dynamic response to environmental cues [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 991107.
- [6] EJAZ B, MUJIB A, SYEED R, et al. Phytochemicals and regulation of flavonoids in in vitro-grown safflower plant tissue by abiotic elicitor CdCl₂ [J]. Metabolites, 2024, 14(2): 127.
- [7] ZHANG Y Y, YU L, JIN W F, et al. Simultaneous optimization of the ultrasonic extraction method and determination of the antioxidant activities of hydroxysafflower yellow a and anhydrosafflower yellow b from safflower using a response surface methodology [J]. Molecules, 2020, 25(5): 1226.
- [8] LIN L, XU M F, MA L J, et al. A rapid analysis method of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) using combination of computer vision and near-infrared[J]. Spectrochimica Acta. Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2020, 236: 118360.
- [9] 杨宇, 黄兴琳, 江忠敏, 等. 中药红花化学成分与药理作用研究新进展[J]. 中华中医药学刊, 2023, 41(10): 119-126.
YANG Y, HUANG X L, JIANG Z M, et al. New research progress for chemical compositions and pharmacological effect of Honghua (*Carthami Flos*) [J]. Chinese Archives of Traditional Chinese Medicine, 2023, 41(10): 119-126.
- [10] WU X Y, CAI X B, AI J X, et al. Extraction, structures, bioactivities and structure-function analysis of the polysaccharides from safflower (*Carthamus tinctorius* L.) [J]. Frontiers in Pharmacology, 2021, 12: 767947.
- [11] 赵涛, 李三喜, 谢昌鸿. 红花注射液联合辛伐他汀对急性心肌梗死患者的临床疗效[J]. 中成药, 2019, 41(3): 563-566.
ZHAO T, LI S X, XIE C H. Clinical effects of Honghua injection combined with simvastatin on acute myocardial infarction patients [J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2019, 41(3): 563-566.
- [12] RUYVARAN M, ZAMANI A, MOHAMADIAN A, et al. Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) oil could improve abdominal obesity, blood pressure, and insulin resistance in patients with metabolic syndrome: a randomized, double-blind, placebo-controlled clinical trial [J]. Journal

of Ethnopharmacology, 2022, 282: 114590.

[13] 赵晶云, 马俊奎, 任小俊, 等. 大豆资源抗旱表型指标筛选及抗旱性评价[J]. 大豆科学, 2022, 41(4): 420-426.

ZHAO J Y, MA J K, REN X J, et al. Screening of soybean drought resistance phenotypic index and evaluation of drought resistant resources [J]. Soybean Science, 2022, 41(4): 420-426.

[14] 程田田, 陈佳, 赖铭, 等. 芥甘种间杂交甘蓝型油菜花期干旱响应研究[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(6): 79-87.

CHENG T T, CHEN J, LAI M, et al. Drought response during flowering stage of new type *Brassica napus* L. derived from interspecific hybridization between *B.juncea*×*B.napus* [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(6): 79-87.

[15] 王月平, 徐剑文, 赵君, 等. 棉花抗旱性综合评价及其相关性分析[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(1): 1-13.

WANG Y P, XU J W, ZHAO J, et al. Comprehensive evaluation and correlation analysis of drought resistance of cotton[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2024, 40(1): 1-13.

[16] 岳丽, 山其米克, 王卉, 等. 新疆高粱种质资源萌发期抗旱性综合评价[J]. 草地学报, 2024, 32(2): 553-561.

YUE L, SHAN Q M K, WANG H, et al. Comprehensive evaluation of drought resistance of sorghum germplasm resources during germination in Xinjiang[J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(2): 553-561.

[17] WANG S, ZHOU H, HE Z B, et al. Effects of drought stress on leaf functional traits and biomass characteristics of *Atriplex canescens* [J]. Plants, 2024, 13(14): 2006.

[18] SHAMUYARIRA K W, SHIMELIS H, FIGLAN S, et al. Combining ability analysis of yield and biomass allocation related traits in newly developed wheat populations[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 11832.

[19] 何源, 谷晓童, 冯莉情, 等. 玉米苗期和萌发期抗旱指数筛选及评价[J]. 中国农业科技导报, 2024, 26(10): 30-40.

HE Y, GU X T, FENG L Q, et al. Screening and evaluation of drought resistance index for maize hybrids during seedling and germination stages[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2024, 26(10): 30-40.

[20] WANG H Y, CHEN Y, GUO F X, et al. Evaluating drought tolerance in *Codonopsis pilosula* seedlings: combining growth, physiology, yield, and tolerance indices[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2025, 26(4): 1600.

[21] HASSANIS M R, POURDAD S S, NAJI A M, et al. Genome-wide association mapping in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) for genetic dissection of drought tolerance using DArTseq markers[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 31490.

[22] CHEN H Z, SONG L L, ZHOU H J, et al. ABA signal transduction and ROS metabolic balance play a key role in the drought resistance of safflower[J]. Plant Growth Regulation, 2025, 105: 273-294.

[23] ZHU Z Y, DUAN W L, ZOU S, et al. Spatiotemporal characteristics of meteorological drought events in 34 major global river basins during 1901-2021[J]. Science of the Total Environment, 2024, 921: 170913.

[24] YANG Y, TILMAN D, JIN Z N, et al. Climate change exacerbates the environmental impacts of agriculture[J]. Science, 2024, 385(6713): eadn3747.

[25] AHMED K, SHABBIR G, AHMED M, et al. Phenotyping for drought resistance in bread wheat using physiological and biochemical traits[J]. Science of The Total Environment, 2020, 729: 139082.

[26] Sato H, Mizoi J, Shinozaki K, et al. Complex plant responses to drought and heat stress under climate change[J]. The Plant Journal: for Cell and Molecular Biology, 2024, 117(6): 1873-1892.

[27] ZAFARI M, EBADI A, JAHANBAKHS S, et al. Safflower (*Carthamus tinctorius*) biochemical properties, yield, and oil content affected by 24-epibrassinosteroid and genotype under drought stress[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(22): 6040-6047.

[28] SUN M Z, LI X Y, XU H, et al. Drought thresholds that impact vegetation reveal the divergent responses of vegetation growth to drought across China[J]. Global Change Biology, 2024, 30(1): e16998.

[29] 孟雨, 田文仲, 温鹏飞, 等. 基于不同发育阶段协同的小麦品种抗旱性综合评判[J]. 作物学报, 2023, 49(2): 570-582.

MENG Y, TIAN W Z, WEN P F, et al. Comprehensive evaluation of drought resistance of wheat varieties based on synergy of different developmental stages [J]. Acta Agronomica Sinica, 2023, 49(2): 570-582.

[30] 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.

[31] 马越, 李玉姗, 王帆, 等. 番茄种质资源萌发期抗旱性综合评价及筛选[J]. 植物遗传资源学报, 2024, 25(7): 1056-1069.

MA Y, LI Y S, WANG F, et al. Comprehensive evaluation and screening of drought resistance of tomato germplasm resources during germination period[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2024, 25(7): 1056-1069.

[32] 朱丽丽, 张发玉, 安宁, 等. 116 份藜麦种质资源萌发期抗旱性综合评价[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(1): 23-31.

ZHU L L, ZHANG F Y, AN N, et al. Comprehensive evaluation of drought resistance of 116 quinoa germplasm resources during germination[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(1): 23-31.

[33] 魏波, 侯凯, 王庆, 等. 干旱胁迫对不同类型红花品种(系)苗期生理生化特性的影响[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(3): 391-398.

WEI B, HOU K, WANG Q, et al. Effect of drought stress on photosynthetic characteristics and physiological and biochemical traits of different safflower varieties (lines) [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(3): 391-398.

[34] 魏波, 李丹丹, 侯凯, 等. PEG 模拟干旱条件下红花种子萌发特性的比较研究[J]. 植物生理学报, 2018, 54(6): 1137-1143.

WEI B, LI D D, HOU K, et al. Comparative study on germination characteristics of safflower (*Carthamus tinctorius*) under PEG-6000 simulated drought stress[J]. Plant Physiology Communications, 2018, 54(6): 1137-1143.

[35] 王沛琦, 胡尊红, 杨谨, 等. 药用型红花苗期抗旱性评价[J]. 中国现代中药, 2021, 23(4): 660-665.

WANG P Q, HU Z H, YANG J, et al. Evaluation of drought resistance of medicinal safflower in seedling stage [J]. Modern Chinese Medicine, 2021, 23(4): 660-665.