

张丽欣, 孟盼盼, 吕清豪, 等. 药菊苗期抗旱性综合评价及抗旱鉴定指标筛选[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(10): 1942-1951.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2024.10.019

药菊苗期抗旱性综合评价及抗旱鉴定指标筛选

张丽欣¹, 孟盼盼¹, 吕清豪¹, 李 坤², 祁瑞林², 张红瑞¹

(1. 河南农业大学农学院, 河南 郑州 450046; 2. 河南省经济作物推广总站, 河南 郑州 450002)

摘要: 为研究干旱胁迫对不同栽培类型药菊苗期生长的影响, 并筛选耐旱性较强的药菊栽培类型和适宜的抗旱性鉴定指标, 为抗旱药菊种质选择奠定基础, 本研究以 5 个栽培类型药菊为材料, 测定其在干旱胁迫下苗期的生长指标和生理生化指标, 并使用相关性分析、主成分分析、隶属函数分析相结合的方法对其进行抗旱性综合评价。结果表明, 干旱胁迫下药菊苗期植株变矮; 随着干旱胁迫加重, 其地下部干重、根冠比、总根投影面积等指标呈降低趋势, 脯氨酸、可溶性糖和可溶性蛋白质含量呈增长趋势。抗旱性综合评价结果表明, 怀菊抗旱性综合评价值最大(0.854), 皇菊抗旱性综合评价值最小(0.093), 5 个栽培类型药菊抗旱性为怀菊>滁菊>毫菊>杭菊>皇菊; 叶片相对含水量、叶片干重、地下部干重、根冠比、叶绿素相对含量(SPAD 值)和过氧化物酶活性等可作为药菊苗期的抗旱性鉴定指标。

关键词: 药菊; 苗期; 干旱胁迫; 抗旱性综合评价

中图分类号: S682.1⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4440(2024)10-1942-10

Comprehensive evaluation of drought resistance and screening of drought resistance identification indicators in *Chrysanthemum morifolium* seedling stage

ZHANG Lixin¹, MENG Panpan¹, LYU Qinghao¹, LI Shen², QI Ruilin², ZHANG Hongrui¹

(1. College of Agronomy, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China; 2. Cash Crop Promotion Station of Henan Province, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The purpose of this study was to study the effects of drought stress on the seedling growth of different cultivation types of *Chrysanthemum morifolium* Ramat., and to screen the cultivation types with strong drought tolerance and suitable drought-resistant identification indexes, so as to lay a foundation for the selection of drought-resistant *C. morifolium* germplasm. In this study, five cultivated types of *C. morifolium* were used as materials, and their seedling growth and phys-

iological and biochemical indexes were measured under drought stress, and their drought resistance was comprehensively evaluated using a combination of correlation analysis, principal component analysis and membership function analysis. The results showed that under drought stress, the seedlings of *C. morifolium* became shorter. With the aggravation of drought stress, the underground dry weight, root-shoot ratio and total root projected area showed a decreasing trend, but the proline content, soluble sugar content and soluble protein content showed

收稿日期: 2023-10-27

基金项目: 河南省财政科技兴林项目(YLK202305); 河南省中药材产业科技特派员服务团项目(2024); 国家自然科学基金项目(31701370); 河南省教育厅高等学校重点科研项目(19A210005, 23A210002)

作者简介: 张丽欣(1998-), 女, 河南宜阳人, 硕士, 主要从事药用植物资源与栽培研究。(E-mail) 1561079373@qq.com

通讯作者: 张红瑞, (E-mail) zhanghongrui2003@126.com; 李 坤, (E-mail) 15003835012@163.com; 祁瑞林, (E-mail) 15538360258@163.com

an increasing trend. The results of comprehensive evaluation of drought resistance indicated that the comprehensive evaluation value of drought resistance of Huaiju was the largest (0.854), and the comprehensive evaluation value of drought resistance of Huangju was the smallest (0.093). The drought resistance of five cultivated types of *C. morifolium* followed the order of Huaiju > Chuju > Boju > Hangju > Huangju. The relative water content, leaf dry weight, underground dry weight, root-shoot ratio, relative chlorophyll content (SPAD value) and peroxidase activity can be used as drought resistance identification indexes of *C. morifolium* at seedling stage.

Key words: *Chrysanthemum morifolium* Ramat.; seedling stage; drought stress; comprehensive evaluation of drought resistance

中药菊花是菊科植物菊(*Chrysanthemum morifolium* Ramat.)的干燥头状花序^[1],菊栽培历史源远流长,被广泛应用于医疗保健、食品、茶饮等领域。按照形态、产地和加工方法的不同,2020版《中国药典》共收录了5个栽培类型药菊,包括怀菊、杭菊、贡菊、亳菊和滁菊。河南是怀菊的道地产区,近年来,河南省多地引种杭菊、贡菊、亳菊、滁菊、金丝皇菊和婺源皇菊等栽培类型药菊。河南省属于温带季风性气候,降雨偏少且分布不均匀,常发生季节性干旱,一些引种的药菊,其原产地降雨丰沛,水分条件与河南差别较大,加之河南药菊生产以山坡和丘陵地为主,使得降雨不均匀及灌溉条件欠缺引起的干旱成为目前限制药菊生产的主要因素。全球气候变暖使得干旱日益成为影响作物生长和产量的关键非生物胁迫因素之一^[2-3]。

药菊生产上以扦插为主,每年5、6月移栽后的一段时间是干旱易发、频发期,严重影响扦插苗的移栽成活率,还可能影响其正常生长发育,甚至会对产量、外观品质和内在品质造成一定影响,因此鉴定各栽培类型药菊苗期抗旱性对干旱易发、频发地区药菊的生产具有重要意义。作物苗期抗旱性鉴定具有周期短、重复性强、条件易控制等优点^[4],被广泛应用于抗旱性鉴定工作中,薏苡^[5]、重楼^[6]、红花^[7]、白芷^[8]等药用植物苗期的抗旱性鉴定已有相关报道。目前有关药菊的研究主要集中在栽培技术^[9-10]、有效成分^[11]、组织培养^[12]、药理药效^[13]等方面,关于药菊对于干旱胁迫的响应及抗旱性鉴定的研究较少。鉴于此,本研究以怀菊、杭菊、亳菊、滁菊、皇菊5个栽培类型药菊为试验材料,在日光温室中采用盆栽控水法进行试验,通过对不同栽培类型药菊苗期生长指标和生理生化指标的观测,分析其生长及生理的变化规律,并采用主成分分析法和隶属函数法等分析方法^[14]对药菊进行抗旱性综合评价,从而为药菊抗旱品种的选育、抗旱资源的利用等提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料来源于课题组前期收集的菊花种质资源,包含5个栽培类型药菊,分别为怀菊、杭菊、亳菊、滁菊、皇菊,5个栽培类型药菊由河南农业大学张红瑞教授鉴定。

1.2 试验方法

在河南农业大学日光温室中进行盆栽控水试验。2022年4月,选取插条进行扦插育苗,待其生根后,将健壮且长势均一的幼苗移栽到统一规格的花盆中,每盆种植1株。基质为过筛的风干园土,每盆3 kg,测得土壤田间持水量为24.3%。每个花盆都配有托盘,以收集因浇水等原因流失的土壤。待缓苗15 d后,开始进行干旱处理。每个栽培类型设对照(CK)、轻度干旱(T1)和重度干旱(T2)3个处理,维持不同的土壤相对含水量分别为田间最大持水量的80%~90%、60%~50%和20%~30%,每个处理6盆,3次重复,共270盆。每2 d进行一次称重补水,处理1个月后取样,测定各项指标。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 生长指标 用清水冲洗样品后,使用根系扫描仪扫描根系,得到根系生长指标数据;用直尺测量株高;用游标卡尺测量茎粗;用烘干法测量叶片干重、地下部分干重和根冠比。

1.3.2 生理指标 可溶性糖(SS)、可溶性蛋白质(SP)和脯氨酸(Pro)含量分别用蒽酮比色法、考马斯亮蓝G-250染色法和茚三酮显色法测定;超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)活性分别用氮蓝四唑光还原法、愈创木酚法测定;用硫代巴比妥酸比色法测定丙二醛(MDA)含量;用丙酮研磨法测定叶绿素含量;使用便携式叶绿素仪测定叶绿素相对含量(SPAD值);采用常规的烘干、称重方法测定叶片相对含水量^[15]。

1.4 数据处理与分析

利用 Microsoft Excel 2019 对数据进行整理,并使用 SPSS 24.0 进行统计分析。参照田小霞等^[16]、徐银萍等^[17]、欧巧明等^[18]、张红瑞等^[19-20]、李海明等^[21]、王焱等^[22]的研究方法,用公式(2)计算隶属函数值 $\mu(X_i)$,公式(3)计算因子权重系数(W_i),公式(4)计算综合指标值(CI),公式(5)计算 5 个栽培类型药菊在干旱胁迫下用综合指标评价所得的抗旱性综合评价值(D 值)。

$$\text{抗旱系数}(DC) = \frac{\text{干旱胁迫下各指标}}{\text{对照各指标}} \quad (1)^{[16-22]}$$

$$\mu(X_i) = \frac{(X_i - X_{i_{\min}})}{X_{i_{\max}} - X_{i_{\min}}} \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (2)^{[16-22]}$$

式中, X_i 为第 i 个指标的值, $X_{i_{\min}}$ 为第 i 个指标的最小值, $X_{i_{\max}}$ 为第 i 个指标的最大值。

$$W_i = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (3)^{[16-22]}$$

式中, P_i 为第 i 个指标的综合贡献率, W_i 为第 i 个指标在所有指标中的重要程度。

$$CI = \sum_{i=1}^n \alpha_i X_i \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (4)^{[16-22]}$$

式中, α_i 为单一指标特征值对应的特征向量, X_i 为各指标抗旱系数。

$$D = \sum_{i=1}^n [\mu(X_i) \cdot W_i] \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (5)^{[16-22]}$$

表 1 干旱胁迫对药菊苗期地上部性状的影响

Table 1 Effects of drought stress on aboveground characters of *Chrysanthemum morifolium* at seedling stage

栽培类型	处理	株高 (cm)	茎粗 (mm)	叶片干重 (g)	叶片相对含水量 (%)
亳菊	CK	15.01±2.27a	3.87±0.47a	0.10±0.01a	79.76±2.74a
	T1	14.56±1.91a	3.97±0.55a	0.08±0.01b	78.71±3.17a
	T2	13.80±1.99b	3.50±0.32b	0.07±0.01b	75.60±3.13b
滁菊	CK	12.34±2.04a	3.98±0.53a	0.06±0.01a	77.69±1.64a
	T1	11.69±1.07ab	3.68±0.86a	0.05±0.01b	77.12±2.12a
	T2	11.23±1.17b	3.30±0.59b	0.05±0.01b	75.30±1.63b
杭菊	CK	15.89±2.53a	4.00±0.63a	0.09±0.01a	84.97±1.83a
	T1	15.01±1.86ab	3.89±0.46a	0.07±0.01b	84.67±1.02a
	T2	13.05±1.33b	3.42±0.37b	0.06±0.02b	81.71±2.87b
皇菊	CK	15.83±1.07a	3.88±0.68ab	0.08±0.01a	79.60±1.86a
	T1	14.27±1.16a	4.15±0.91a	0.06±0.01b	77.53±1.11ab
	T2	12.77±0.76b	3.76±0.93b	0.05±0.02b	75.09±2.35b
怀菊	CK	14.53±2.17a	4.19±0.34a	0.07±0.01a	81.19±1.47a
	T1	14.04±1.73ab	4.04±0.41ab	0.06±0.02a	81.16±1.49a
	T2	13.37±1.54b	3.90±0.52b	0.06±0.01a	79.73±2.89a

CK:对照;T1:轻度干旱;T2:重度干旱。同列中同一栽培类型不同小写字母表示处理之间差异显著($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对不同栽培类型药菊苗期植物学性状的影响

2.1.1 地上部性状 由表 1 可知,药菊苗期在干旱胁迫下生长受到抑制,但因干旱程度和栽培类型的不同,抑制程度各不相同。5 个栽培类型药菊随着干旱胁迫增加,株高呈下降趋势,且重度胁迫处理与对照之间的差异达到显著水平,与对照相比,亳菊、滁菊、杭菊、皇菊和怀菊的株高降幅分别为 8.06%、9.00%、17.87%、19.33%、7.98%;随着干旱胁迫的加重,5 个栽培类型药菊的茎粗呈降低趋势,且重度干旱胁迫处理的茎粗与 CK 相比显著降低。

干旱胁迫下药菊的叶片相对含水量呈降低趋势,重度干旱胁迫下,除怀菊外其他栽培类型药菊的叶片相对含水量较对照降低均达到显著差异水平,下降幅度从大到小依次为:皇菊(5.67%)>亳菊(5.22%)>杭菊(3.84%)>滁菊(3.08%)>怀菊(1.80%)。除怀菊外,其他栽培类型药菊的叶片干重随着干旱胁迫的加重呈降低趋势,5 个栽培类型药菊在重度干旱胁迫下叶片干重降幅为 14.29%~37.50%,其中皇菊的降幅最大(37.50%),怀菊降幅最小(14.29%)。

2.1.2 根系性状 由表 2 可知,随干旱胁迫的加重,5 个栽培类型药菊根冠比、总根投影面积、总根表面积、平均根系直径、总根长、总根体积和地下部干重等指标均呈降低趋势,杭菊、滁菊和怀菊的根冠比、总根投影面积在轻度干旱胁迫下与对照差异不显著,重度干旱胁迫下与对照均差异显著,杭菊地下部干重降幅最大(41.80%),降幅最小的是怀菊(27.43%);根冠比降幅为 26.79%~39.29%,其中皇菊降幅最大、怀菊降幅最小;总根投影面积降幅最大的是亳菊(52.10%),降幅最小的是怀菊(14.42%)。除怀菊外,其他栽培类型药菊的总根表面积、总根长和总根体积均随干旱胁迫的加重呈

显著降低趋势,总根表面积在重度干旱胁迫下降幅从大到小依次为:亳菊(52.75%)>皇菊(40.81%)>杭菊(38.42%)>滁菊(34.45%)>怀菊(15.27%);总根长在重度干旱胁迫下降幅从大到小依次为:皇菊(40.97%)>杭菊(39.51%)>亳菊(38.88%)>滁菊(35.67%)>怀菊(20.37%);总根体积在重度干旱胁迫下降幅从大到小依次为:亳菊(50.00%)>皇菊(45.95%)>滁菊(42.35%)>杭菊(40.82%)>怀菊(19.10%)。在轻度干旱胁迫下,各栽培类型药菊的平均根系直径与对照之间均没有显著差异,但在重度干旱胁迫条件下与对照均差异显著。

表 2 干旱胁迫对药菊苗期根系性状的影响

Table 2 Effects of drought stress on root characters of *Chrysanthemum morifolium* at seedling stage

栽培类型	处理	根冠比	总根投影面积 (mm ²)	总根表面积 (mm ²)	平均根系直径 (cm)	总根长 (mm)	总根体积 (mm ³)	地下部干重 (g)
亳菊	CK	0.59±0.04a	62.02±3.99a	194.85±20.66a	0.36±0.05a	1 789.60±64.67a	1.72±0.06a	2.02±0.14a
	T1	0.43±0.09b	49.35±2.48b	164.87±18.37b	0.36±0.07a	1 371.21±32.38b	1.22±0.04b	1.79±0.07b
	T2	0.40±0.07b	29.71±2.91c	92.06±8.37c	0.30±0.02b	1 093.83±44.83c	0.86±0.08c	1.40±0.09c
滁菊	CK	0.47±0.09a	33.83±4.85a	106.27±14.53a	0.32±0.02a	1 062.13±82.58a	0.85±0.07a	1.10±0.16a
	T1	0.43±0.03a	29.00±3.16a	85.58±10.52b	0.33±0.05a	841.59±76.66b	0.67±0.07b	0.96±0.17a
	T2	0.33±0.07b	21.99±3.42b	69.66±6.26c	0.29±0.03b	683.27±54.79c	0.49±0.06c	0.71±0.11b
杭菊	CK	0.42±0.16a	20.06±2.49a	63.02±9.31a	0.32±0.06a	641.20±31.57a	0.49±0.09a	1.22±0.09a
	T1	0.38±0.07a	18.22±1.86a	52.57±5.61b	0.30±0.04a	558.55±47.49b	0.36±0.07b	1.09±0.18a
	T2	0.27±0.06b	12.35±4.56b	38.81±4.93c	0.25±0.01b	387.86±46.62c	0.29±0.03c	0.71±0.29b
皇菊	CK	0.56±0.11a	42.35±4.35a	133.04±15.24a	0.33±0.04a	1 267.34±78.58a	1.11±0.04a	1.89±0.11a
	T1	0.44±0.06b	34.02±2.44b	103.35±16.62b	0.34±0.03a	938.35±53.50b	0.91±0.10b	1.50±0.14b
	T2	0.34±0.04c	22.52±2.87c	78.74±4.71c	0.28±0.04b	748.13±29.97c	0.60±0.04c	1.14±0.22c
怀菊	CK	0.56±0.05a	37.66±2.75a	118.33±13.28a	0.30±0.01a	1 266.12±57.39a	0.89±0.06a	1.75±0.20a
	T1	0.50±0.08ab	34.35±2.53ab	107.23±11.62ab	0.28±0.02ab	1 101.37±35.03b	0.85±0.09a	1.63±0.18a
	T2	0.41±0.06b	32.23±4.21b	100.26±9.31b	0.26±0.01b	1 008.24±53.76c	0.72±0.06b	1.27±0.13b

CK、T1、T2 见表 1 注。同列中同一栽培类型不同小写字母表示处理之间差异显著。

2.2 干旱胁迫对不同栽培类型药菊苗期生理指标的影响

由表 3 可知,干旱胁迫对 5 个栽培类型药菊 MDA 含量产生了显著影响。干旱程度加剧,直接导致各栽培类型药菊中 MDA 含量上升。在轻度干旱胁迫下,MDA 的积累速度相对较慢,在重度干旱胁迫下积累速度迅速上升。其中,杭菊的 MDA 含量增幅最大,达到 59.09%,可见干旱胁迫对杭菊的细胞膜损伤程度最重。

随着干旱胁迫的加重,脯氨酸(Pro)、可溶性

糖(SS)和可溶性蛋白质(SP)含量呈增加趋势,重度干旱胁迫下各栽培类型药菊均与对照差异显著,增幅从大到小分别为:杭菊(100.00%)>滁菊(83.33%)>亳菊(75.00%)=怀菊(75.00%)>皇菊(66.67%)、怀菊(86.74%)>滁菊(66.64%)>亳菊(58.60%)>皇菊(52.28%)>杭菊(48.29%)、滁菊(48.65%)>杭菊(45.58%)>亳菊(44.73%)>怀菊(39.23%)>皇菊(34.08%),说明怀菊和滁菊在遭受干旱胁迫时,能够积累更多的渗透调节物质,以缓解逆境胁迫压力并提高在干旱环境下的适应能力。

随着干旱胁迫的增加,5 个栽培类型药菊的 *POD* 活性呈升高趋势;在轻度干旱胁迫下,杭菊和皇菊的 *SOD* 活性显著升高,但在重度干旱胁迫下,其活性与对照相比表现出显著下降,降幅分别为

15.67%、34.14%;轻度干旱胁迫下,毫菊、怀菊的叶绿素含量与对照相比显著增加,重度干旱胁迫下滁菊、杭菊、怀菊的叶绿素含量与对照相比显著增加。

表 3 干旱胁迫对药菊苗期生理指标的影响

Table 3 Effects of drought stress on physiological indices of *Chrysanthemum morifolium* at seedling stage

栽培类型	处理	脯氨酸含量 (mg/g)	可溶性糖含量 (mg/g)	丙二醛含量 (mmol/g)	可溶性蛋白 含量 (mg/g)	超氧化物 歧化酶活性 (U/g,FW)	过氧化物 酶活性 [U/(g·min),FW]	叶绿素含量 (mg/g)	叶绿素 相对含量 (SPAD 值)
毫菊	CK	0.04±0.01c	14.30±1.59c	0.21±0.06b	17.93±2.12c	485.39±41.10c	161.24±14.71c	2.92±0.55b	45.37±2.32b
	T1	0.05±0.01b	15.85±2.34b	0.23±0.02b	21.53±2.21b	597.59±39.66a	340.09±39.29b	3.24±0.38a	51.32±3.82a
	T2	0.07±0a	22.68±4.65a	0.32±0.04a	25.95±1.33a	567.46±35.70b	395.11±24.54a	3.17±0.48ab	42.23±3.45b
滁菊	CK	0.06±0.01b	12.44±0.57b	0.17±0.04b	19.26±2.28c	556.97±11.58b	91.70±13.71b	2.76±0.36b	53.06±4.26a
	T1	0.07±0.01b	12.92±1.82b	0.20±0.04ab	23.33±2.02b	633.37±25.10a	116.81±10.66b	2.88±0.25ab	54.16±2.06a
	T2	0.11±0a	20.73±3.27a	0.23±0.03a	28.63±5.80a	571.62±38.30b	334.04±14.54a	2.95±0.22a	49.77±5.17b
杭菊	CK	0.05±0.01c	12.28±1.73b	0.22±0.01c	12.77±2.76c	295.30±38.68b	159.11±19.91c	2.67±0.40b	43.08±2.92a
	T1	0.06±0b	14.15±2.14a	0.26±0.06b	15.80±0.91b	438.95±45.16a	242.52±36.44b	2.75±0.57ab	46.64±5.38a
	T2	0.10±0a	18.21±1.73a	0.35±0.02a	18.59±3.62a	249.03±57.83c	377.33±49.31a	2.87±0.70a	38.80±6.44b
皇菊	CK	0.06±0.01c	12.70±1.25b	0.26±0.02c	10.30±0.77b	298.13±112.65b	160.44±38.96b	2.71±0.36a	48.08±4.63a
	T1	0.07±0.01b	15.94±0.90a	0.29±0b	12.73±1.14ab	430.30±20.15a	177.56±8.05b	2.72±0.75a	50.04±1.81a
	T2	0.10±0a	19.34±3.91a	0.39±0.02a	13.81±2.04a	196.35±27.47c	270.52±6.83a	2.57±0.35a	42.65±8.43b
怀菊	CK	0.04±0b	11.54±1.21c	0.17±0.01b	16.01±3.25c	374.26±55.70b	84.89±20.29c	3.54±0.12c	51.34±2.90a
	T1	0.03±0c	16.37±3.08b	0.18±0.06b	20.70±1.66b	526.64±21.13a	217.78±29.12b	3.91±0.58b	54.23±1.56a
	T2	0.07±0a	21.55±1.68a	0.24±0.02a	22.29±1.79a	499.71±57.16a	253.78±27.09a	4.36±0.39a	52.37±5.19a

CK、T1、T2 见表 1 注。同列中同一栽培类型不同小写字母表示处理之间差异显著。

2.3 药菊抗旱性综合评价

重度干旱胁迫下,几乎所有指标均与对照差异显著,因此选择重度干旱胁迫下对参试药菊进行抗旱性综合评价。从表 4 可以观察到,有的单项指标之间存在或大或小的相关性,使反映的信息发生重叠,故根据单一指标的抗旱系数得出抗旱性大小具有一定的片面性。因此,采用主成分降维的方法来进行更深入的分析。主成分分析法是一种高效的数据降维方法,它通过利用各指标之间的内在联系,将多个变量综合概括为少数几个综合指标。

对 19 个单项指标的抗旱系数进一步分析^[19-20],转化成 3 个综合指标的贡献率分别为:63.921%、17.703%和 11.428%,总贡献率 93.052%,表明这 3 个综合指标可以概括原来 19 个单项指标的抗旱系数所包含的 93.052%的信息。第 1 主成分在叶绿素含量、SPAD 值、根冠比和地下部干重上有较大载荷,表明第 1 主成分主要反映的是根系生长情况和叶绿素含量等主要信息;第 2 主成分在茎粗、Pro 含量、SP 含量、*POD* 活性上有较大载荷,表明第 2 主成分主要反映的

是地上部形态、渗透调节物质和抗氧化酶活性等信息;第 3 主成分在总根投影面积、平均根系直径、总根体积上有较大载荷,表明第 3 主成分主要反映的是根系生长情况的信息。

参照文献[16]~[22]计算方法,各指标计算结果见表 5、表 6 和表 7。由表 7 可知,5 个栽培类型药菊抗旱性为怀菊>滁菊>毫菊>杭菊>皇菊。

2.4 药菊抗旱性鉴定指标筛选

参照文献[16]~[22]计算方法,预测 5 个栽培类型药菊抗旱能力的最优回归方程为: $D = -0.265X_1 + 5.274X_2 - 1.277X_3 + 6.254X_4 - 7.677$, X_1 (SPAD 值)、 X_2 (叶片相对含水量)、 X_3 (地下部干重)、 X_4 (根冠比)等 4 个指标对药菊苗期抗旱能力有显著影响,得到的回归方程的决定系数 $R^2 \approx 1$, $P < 0.05$,说明模型拟合度好,预测值精确度高,用这个回归方程进行药菊苗期抗旱性评价效果好。可在药菊苗期抗旱能力评价中,有针对性地测定这 4 个指标,简洁有效地鉴定药菊的抗旱性,从而使鉴定工作更加简化。

表 4 干旱胁迫下各指标相关性分析
Table 4 Correlation analysis of indicators under drought stress

指标	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17	X18	X19
X1	1.000																		
X2	-0.277	1.000																	
X3	0.783	-0.339	1.000																
X4	0.593	-0.428	0.921*	1.000															
X5	0.914*	-0.311	0.943*	0.863	1.000														
X6	0.346	-0.034	0.793	0.896*	0.688	1.000													
X7	0.222	0.071	0.727	0.813	0.575	0.981**	1.000												
X8	0.553	-0.077	0.690	0.394	0.536	0.336	0.383	1.000											
X9	0.578	0.155	0.816	0.818	0.809	0.917*	0.876	0.398	1.000										
X10	0.322	0.147	0.711	0.813	0.647	0.977**	0.960**	0.247	0.950*	1.000									
X11	0.900*	0.124	0.732	0.561	0.871	0.498	0.406	0.477	0.783	0.552	1.000								
X12	-0.214	-0.745	-0.020	0.303	-0.034	0.103	0.016	-0.505	-0.183	-0.005	-0.434	1.000							
X13	0.747	0.078	0.904*	0.799	0.895*	0.823	0.779	0.621	0.954*	0.830	0.877	-0.317	1.000						
X14	-0.625	0.188	-0.826	-0.586	-0.674	-0.503	-0.524	-0.975**	-0.534	-0.401	-0.541	0.359	-0.727	1.000					
X15	0.402	-0.969**	0.310	0.367	0.361	-0.066	-0.203	0.022	-0.169	-0.221	0.000	0.679	-0.072	-0.124	1.000				
X16	0.916*	-0.156	0.787	0.721	0.944*	0.567	0.429	0.320	0.777	0.586	0.937*	-0.092	0.833	-0.446	0.272	1.000			
X17	0.727	-0.712	0.888*	0.821	0.821	0.529	0.443	0.637	0.474	0.376	0.479	0.250	0.613	-0.765	0.678	0.619	1.000		
X18	0.711	-0.158	0.786	0.857	0.889*	0.787	0.660	0.152	0.880*	0.803	0.793	0.132	0.830	-0.330	0.210	0.921*	0.574	1.000	
X19	0.751	0.040	0.878*	0.832	0.915*	0.840	0.768	0.462	0.973**	0.861	0.888*	-0.195	0.980**	-0.594	-0.015	0.894*	0.587	0.922*	1.000

X1:株高;X2:茎粗;X3:叶片干重;X4:叶片相对含水量;X5:根冠比;X6:总根投影面积;X7:总根表面积;X8:平均根系直径;X9:总根长;X10:总根体积;X11:地下部干重;X12:脯氨酸含量;X13:可溶性糖含量;X14:丙二醛含量;X15:可溶性蛋白质含量;X16:超氧化物歧化酶活性;X17:过氧化物酶活性;X18:叶绿素含量;X19:叶绿素相对含量。*表示相关性显著($P<0.05$),**表示相关性极显著($P<0.01$)。

表 5 各单项指标抗旱系数
Table 5 Drought resistance coefficient of each single index

指标	亳菊	滁菊	杭菊	皇菊	怀菊	平均值	指标	亳菊	滁菊	杭菊	皇菊	怀菊	平均值
株高	0.92	0.91	0.82	0.81	0.92	0.88	总根体积	0.50	0.58	0.59	0.54	0.81	0.60
茎粗	0.90	0.83	0.86	0.97	0.93	0.90	脯氨酸含量	1.75	1.83	2.00	1.67	1.75	1.80
叶片干重	0.70	0.83	0.67	0.63	0.86	0.74	可溶性糖含量	1.59	1.67	1.48	1.52	1.87	1.63
叶片相对含水量	0.95	0.97	0.96	0.94	0.98	0.96	丙二醛含量	1.52	1.35	1.59	1.50	1.41	1.47
地下部干重	0.69	0.65	0.58	0.60	0.73	0.65	可溶性蛋白质含量	1.45	1.49	1.46	1.34	1.39	1.43
根冠比	0.68	0.70	0.64	0.61	0.73	0.67	超氧化物歧化酶活性	1.17	1.03	0.84	0.66	1.34	1.01
总根投影面积	0.48	0.65	0.62	0.53	0.86	0.63	过氧化物酶活性	2.45	3.64	2.37	1.69	2.99	2.63
总根表面积	0.47	0.66	0.62	0.59	0.85	0.64	叶绿素含量	1.09	1.07	1.07	0.95	1.23	1.08
平均根系直径	0.83	0.91	0.78	0.85	0.87	0.85	叶绿素相对含量	0.93	0.94	0.90	0.89	1.02	0.94
总根长	0.61	0.64	0.60	0.59	0.80	0.65							

19 个指标的抗旱系数与 D 值的相关性分析结果(表 8)显示,叶片干重、叶片相对含水量、根冠比和 POD 活性的抗旱系数与 D 值的相关系数分别为 0.964、0.954、0.966 和 0.895。因此叶片干重、叶片

相对含水量、根冠比和 *POD* 活性可以作为药菊苗期的抗旱性鉴定指标,这与逐步回归得到的抗旱性鉴定指标类似。

综合逐步回归分析和相关性分析的抗旱指标筛

选结果为叶片相对含水量、根冠比、叶片干重、地下部干重、SPAD 值和 *POD* 活性可以作为药菊苗期的抗旱性鉴定指标,在类似干旱条件下,可通过测定以上 6 项指标快速检测和预测其抗旱性。

表 6 各综合指标的系数及贡献率

Table 6 Coefficient and contribution rate of each comprehensive index

指标	CI1	CI2	CI3	指标	CI1	CI2	CI3
株高	0.236	0.057	-0.210	总根体积	0.245	-0.082	0.316
茎粗	-0.051	-0.534	0.062	脯氨酸含量	-0.026	0.451	0.366
叶片干重	0.276	0.086	-0.106	可溶性糖含量	0.276	-0.141	-0.033
叶片相对含水量	0.258	0.160	0.138	丙二醛含量	-0.201	-0.003	0.430
地下部干重	0.246	-0.159	-0.079	可溶性蛋白含量	0.055	0.515	-0.068
根冠比	0.280	0.073	-0.045	超氧化物歧化酶活性	0.259	0.001	0.052
总根投影面积	0.228	0.000	0.223	过氧化物酶活性	0.219	0.306	-0.202
总根表面积	0.266	-0.144	0.164	叶绿素含量	0.259	0.018	0.263
平均根系直径	0.161	-0.051	-0.521	叶绿素相对含量	0.279	-0.112	0.083
总根长	0.266	-0.149	0.145	贡献率 (%)	63.921	17.703	11.428

CI1:综合指标 1;CI2:综合指标 2;CI3:综合指标 3。

表 7 5 个栽培类型药菊综合指标值 $\mu(X)$ 、*D* 值和综合评价

Table 7 Comprehensive index value, $\mu(X)$, *D* value, comprehensive evaluation of five cultivation types of *Chrysanthemum morifolium*

栽培类型	<i>F</i> 1	<i>F</i> 2	<i>F</i> 3	$\mu(1)$	$\mu(2)$	$\mu(3)$	<i>D</i> 值	排序结果
亳菊	3.238	1.416	0.957	0.444	0.420	0.594	0.458	3
滁菊	3.614	1.883	0.653	0.795	1.000	0	0.737	2
杭菊	3.027	1.571	1.165	0.247	0.612	1.000	0.409	4
皇菊	2.763	1.077	1.040	0	0	0.757	0.093	5
怀菊	3.833	1.449	0.982	1.000	0.461	0.643	0.854	1

*F*1~*F*3 分别为综合指标 1 值~综合指标 3 值; $\mu(1)$ ~ $\mu(3)$ 分别为隶属函数 1 值~隶属函数 3 值;*D* 值为抗旱性综合评价值。

表 8 各指标抗旱系数与 *D* 值的相关系数

Table 8 Correlation coefficient between drought resistance coefficient of each index and *D* value

抗旱系数	相关系数	抗旱系数	相关系数
株高抗旱系数	0.804	总根体积抗旱系数	0.779
茎粗抗旱系数	-0.464	脯氨酸含量抗旱系数	0.175
叶片干重抗旱系数	0.964**	可溶性糖含量抗旱系数	0.839
叶片相对含水量抗旱系数	0.954*	丙二醛含量抗旱系数	-0.665
地下部干重抗旱系数	0.720	可溶性蛋白质含量抗旱系数	0.463
根冠比抗旱系数	0.966**	超氧化物歧化酶活性抗旱系数	0.854
总根投影面积抗旱系数	0.770	过氧化物酶活性抗旱系数	0.895*
总根表面积抗旱系数	0.807	叶绿素含量抗旱系数	0.874
平均根系直径抗旱系数	0.497	叶绿素相对含量抗旱系数	0.864
总根长抗旱系数	0.806		

* 表示相关性显著 ($P<0.05$), ** 表示相关性极显著 ($P<0.01$)。

3 讨论

3.1 药菊苗期农艺性状及生理特性的差异与评价

在植物生长过程中,苗期是对水分胁迫较为敏感的阶段之一。在干旱条件下,植物的生长速度会受到明显影响,生长进程缓慢^[23],严重者甚至死亡。植株表型性状的变化是对干旱胁迫最直观的表现^[24],根据任磊等^[25]的研究,发现在干旱胁迫下,茶菊的株高呈现下降趋势,这与本研究结果一致,在其他作物上的研究也得出了一致结果,吴曼等^[26]发现干旱胁迫对马齿苋的株高、叶面积和叶片数量等有抑制作用,方明月等^[27]研究发现在干旱胁迫下紫花苜蓿的株高呈下降趋势。本研究结果表明,在干旱胁迫下,不同栽培类型药菊植株均会出现明显的生长受抑制现象,具体表现为植株高度下降。而且,随着干旱胁迫程度的加剧,这种抑制作用也会相应增强。李王胜等^[28]对于干旱胁迫下甜菜株高的研究结果与本试验结果一致。干旱降低了药菊的叶片干重,其中皇菊和杭菊的降幅较大,可能因其叶片较大,干旱胁迫下小的叶片能够降低蒸腾速率。

植物根系作为物质和能量交换传递的重要器官,直接接触土壤,适应干旱胁迫的重要表现是其形态特征的变化^[29]。董馥慧等^[30]研究发现,干旱胁迫下苦荞根系体积和根系表面积等指标显著减少。宋殿秀等^[31]研究发现干旱使食用向日葵杂交种的根表面积、根体积和根平均直径降低。本研究结果表明,随着干旱胁迫的加重,药菊地下部干重、总根长等根部相关指标呈降低趋势,耐旱能力强的栽培类型具有比较发达的根系和较强的根系吸收能力。

本研究结果显示,在干旱胁迫下,5个栽培类型药菊MDA、Pro、SS和SP含量升高,抗旱性较强的栽培类型可维持较高的SOD、POD活性和较高的渗透调节物质(SS、SP和Pro)含量,缓解活性氧伤害,减轻细胞膜过氧化作用,从而更好地适应干旱环境。这与孙晓梵等^[32]在狗牙根上的研究结果类似。在重度干旱胁迫下,怀菊的SOD活性和POD活性增强最为显著,这表明怀菊具备更强的活性氧清除能力。

3.2 药菊抗旱性评价方法

抗旱性评价是对植物的耐旱能力进行鉴定和归类过程,适宜的评价方法是科学鉴定植物抗旱性的关键^[33],在进行植物抗旱性评价时选择尽量多

的相关指标,并进一步对这些指标的抗旱系数进行分析,才能够最大限度消除供试材料间的差异,较为准确地鉴定评价不同材料的抗旱能力^[34]。本研究选取药菊的19个单项指标的抗旱系数为基础,利用主成分分析法将19个单项指标转换为3个综合指标,进一步结合隶属函数法求得3个综合指标的隶属函数值,进而加权得到抗旱性综合评价值(D值),最后根据D值大小对药菊进行抗旱性评价。利用主成分分析法、隶属函数法等多方法多指标相结合鉴定评价抗旱性已在玉米^[35]、胡麻^[36]、豇豆^[37]、小麦^[38]等作物上成功运用,在茶用菊、观赏菊^[39-40]和切花菊^[41]等菊科植物上也逐步开展了抗旱品种评价等工作,该方法能够在综合考虑各指标的基础上,降低由单一指标引起的信息重叠问题,将各项指标转化成可以代表原信息的新的、个数少且相互独立的综合指标,同时可根据各贡献率进行加权,因此,主成分分析法和隶属函数分析法结合应用于药菊的抗旱性综合评价比较科学有效。

3.3 菊花抗旱性研究进展

目前,观赏菊、茶菊的耐旱性研究已有相关报道,内容多集中在耐旱种质评价、生理机制^[25]、显微结构等方面,关于药用菊花抗旱性评价及抗旱机理的研究较少,同时由于菊花栽培品种多样,观赏菊、茶菊、药菊选育用途不同,导致菊属植物抗旱性鉴定研究结果不一致。汤肖玮等^[42]以54份茶用菊为试验材料,筛选出了7份苗期耐旱性强的种质,并发现部分杂种优势株的抗旱性和耐涝性优于大部分茶用菊主栽品种。田治国等^[43]运用多元统计分析方法对9个万寿菊品种进行了综合评价,发现脯氨酸含量、H₂O₂含量、抗坏血酸含量和过氧化物酶活性等指标对干旱胁迫较敏感。胡同华^[44]以毫菊茎段外植体为受体材料,通过发根农杆菌介导法转入ETD1抗旱基因,发现转基因植株较非转基因植株抗旱性强。孙静^[45]对20个切花菊的抗旱性进行了综合评价,建立了切花菊抗旱性分级标准,比较发现抗旱品种叶片表面表皮毛密集,蜡质含量高,抗氧化酶活性及相关基因表达量可作为切花菊抗旱性评价的指标。栾东涛等^[46]通过对干旱胁迫下4个盆栽小菊地上表型、地下表型、叶片结构、生理指标的观测,筛选出了抗旱性强的品种金陵阳光。姜自红等^[47]对2种药菊和3种野生菊抗旱性进行了比较,确定抗旱性强弱次序为萨摩野菊>野路菊>黄山贡菊>毫

菊>阴歧油菊。

4 结论

重度干旱胁迫对药菊苗期农艺性状和生理指标有显著影响,不同指标对干旱胁迫的响应不完全一致。本研究利用相关性分析法、主成分分析法、隶属函数分析法评价了 5 个栽培类型药菊的抗旱性。结果显示,怀菊的抗旱性最强,可作为药菊抗旱育种及抗旱机理研究的首选种质;筛选出叶片相对含水量、根冠比、叶片干重、地下部干重、SPAD 值和 *POD* 活性等 6 个指标作为药菊苗期的抗旱性鉴定指标。

参考文献:

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典[M]. 北京:中国医药科技出版社,2020:323-324.
- [2] SANCHEZ A C, SUBUDHI P K, ROSENOW D L, et al. Mapping QTLs associated with droughtresistance in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) [J]. Plant Molecular Biology, 2002, 48: 713-726.
- [3] 孙晓琛,原静静,栗锦鹏,等. 干旱胁迫下药用植物响应机制研究进展[J]. 甘肃中医药大学学报,2021,38(5):77-83.
- [4] 孙淑英,陈贵林. 不同种源黄芪种子萌发期抗旱性鉴定[J]. 分子植物育种,2017,15(10):4248-4255.
- [5] 汪 灿,周峻波,张国兵,等. 薏苡种质资源苗期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J]. 中国农业科学,2017,50(15):2872-2887.
- [6] 李纪潮,张金渝,杨天梅,等. 滇重楼种质资源抗旱综合评价及生理机制研究[J]. 中国农业科技导报,2020,22(10):49-59.
- [7] 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.
- [8] 陈郡雯,吴 卫,郑有良,等. 聚乙二醇(PEG-6000)模拟干旱条件下白芷苗期抗旱性研究[J]. 中国中药杂志,2010,35(2):149-153.
- [9] 王 旭. 药菊扦插生根影响因子及技术研究[D]. 郑州:河南农业大学,2012.
- [10] 张红瑞,周 艳,黄 勇,等. 采收时间对 6 个栽培类型药菊产量品质的影响[J]. 山东农业科学,2016,48(7):82-85.
- [11] 屠万倩,刘晓苗,张留记,等. HPLC 法同时测定不同产地不同品种菊花中 8 种成分的含量[J]. 中药材,2018,41(1):147-150.
- [12] 王镡乐,纪宝玉,裴莉昕,等. 怀菊快繁体系及组培苗分级标准的建立[J]. 北方园艺,2021(24):122-128.
- [13] HU C Q, CHEN K, SHI Q, et al. Anti-AIDS agents, 10-acacetyl-7- β -D-galactopyrano side, an anti-HIV principle from *Chrysanthemum morifolium* and a structure-activity correlation with some related flavonoids[J]. Natural Products, 1994, 57(1):42-51.
- [14] 汪 灿,周峻波,张国兵,等. 酒用糯高粱资源成株期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J]. 中国农业科学,2017,50(8):1388-1402.
- [15] 张冬野. 外源水杨酸和氯化钙对番茄抗旱性及差异基因表达的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2016.
- [16] 田小霞,许明爽,郑明利,等. 黄花草木樨苗期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J]. 干旱区资源与环境,2021,35(10):120-127.
- [17] 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.
- [18] 欧巧明,叶春雷,李进京,等. 胡麻种质资源成株期抗旱性综合评价及其指标筛选[J]. 干旱区研究,2017,34(5):1083-1092.
- [19] 张红瑞,张丽欣,王 飞,等. 丹参花果期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J]. 山西农业科学,2023,51(5):502-508.
- [20] 张红瑞,张丽欣,李梦荷,等. 丹参萌发期抗旱性鉴定及抗旱指标筛选[J]. 干旱地区农业研究,2023,41(1):19-26.
- [21] 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.
- [22] 王 焱,沙柏平,李明雨,等. 苜蓿种质资源萌发期抗旱指标筛选及抗旱性综合评价[J]. 植物遗传资源学报,2019,20(3):598-609,623.
- [23] 郭鹏辉,高丹丹,田晓静,等. 干旱胁迫对紫苏种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 中国油料作物学报,2015,37(5):683-687.
- [24] 刘晓丹,关丽云,高 阳,等. 芝麻生长对水分胁迫的响应及抗旱性鉴定[J]. 江苏农业科学,2022,50(14):85-91.
- [25] 任 磊,赵夏陆,许 靖,等. 4 种茶菊对干旱胁迫的形态和生理响应[J]. 生态学报,2015,35(15):5131-5139.
- [26] 吴 曼,金 苇,李 影,等. 干旱胁迫下红、绿茎马齿苋幼苗的生理生化特性比较[J]. 湖北师范大学学报(自然科学版),2022,42(1):38-45.
- [27] 方明月,汪溢磐,赵 奕,等. 低温干旱复合胁迫对 8 个紫花苜蓿品种形态和生理特征的影响[J]. 草地学报,2022,30(11):2967-2974.
- [28] 李王胜,王雪倩,尹希龙,等. 甜菜苗期抗旱性鉴定及指标筛选[J]. 中国农学通报,2022,38(21):17-23.
- [29] 王庆惠,韩 伟,侯银莹,等. 不同耐盐品种棉花根系主要指标对盐分胁迫的响应[J]. 应用生态学报,2018,29(3):865-873.
- [30] 董馥慧,裴红宾,张永清,等. 干旱胁迫与复水对苦荞生长及叶片内源激素含量的影响[J]. 中国农业科技导报,2019,21(12):41-48.
- [31] 宋殿秀,崔良基,王德兴,等. 17 份食用向日葵杂交种苗期抗旱性综合评价[J]. 干旱地区农业研究,2021,39(3):18-22.
- [32] 孙晓梵,张一龙,李培英,等. 不同施氮量对干旱下狗牙根抗氧化酶活性及渗透调节物质含量的影响[J]. 草业学报,2022,31(6):69-78.
- [33] 杨云富,郭巧生,张守栋,等. 水分胁迫对药用白菊花抗干旱生理及药材内在品质的影响[J]. 中国中药杂志,2009,34(4):486-487.
- [34] TOSCANO S, ROMANO D, TRIBULATO A, et al. Effects of drought stress on seed germination of ornamental sunflowers [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2017, 39:184.
- [35] 翟新秘,秦利军,项 阳,等. 隶属函数分析法对 25 份贵州玉米种质抗旱性评价研究[J]. 种子,2018,37(9):51-55.
- [36] 罗俊杰,欧巧明,叶春雷,等. 重要胡麻栽培品种的抗旱性综合评价及指标筛选[J]. 作物学报,2014,40(7):1259-1273.

- [37] RAVELOMBOLA W, QIN J, WENG Y, et al. Evaluation of cowpea for drought tolerance at seedling stage[J]. *Euphytica*, 2020, 216(8):1-19.
- [38] LIU C Y, YANG Z Y, HU Y G. Drought resistance of wheat alien chromosome addition lines evaluated by membership function value based on multiple traits and drought resistance index of grain yield[J]. *Field Crop Research*, 2015, 179:103-112.
- [39] 张常青,洪波,李建科,等. 地被菊花幼苗耐旱性评价方法研究[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(4):789-796.
- [40] 翟丽丽,房伟民,陈发棣,等. 国庆小菊观赏性和耐旱、涝性的综合评价[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(4):734-742.
- [41] 汪本勤,李丕睿,陈发棣. 6个切花菊品种的耐盐性评价[J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2013, 34(1):84-88.
- [42] 汤肖玮,苏江硕,管志勇,等. 茶用菊苗期抗旱性和耐涝性的综合评价[J]. *园艺学报*, 2021, 48(12):2443-2457.
- [43] 田治国,王飞,张文娥,等. 多元统计分析方法在万寿菊品种抗旱性评价中的应用[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(12):3315-3320.
- [44] 胡同华. 毫菊抗旱转基因体系建立及抗旱性评价[D]. 合肥:安徽大学, 2016.
- [45] 孙静. 切花菊抗旱性评价及抗旱机理研究[D]. 南京:南京农业大学, 2012.
- [46] 栾东涛,王婧,张冬梅,等. 四种盆栽小菊抗旱性研究[J]. *北方园艺*, 2020(20):54-61.
- [47] 姜自红,卢漫. 5种菊属植物的抗旱性比较[J]. *长江大学学报(自科版)*, 2018, 15(18):11-14, 4-5.

(责任编辑:蒋永忠)