

4个菊花品种对干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价*

张明晓¹ 于森森² 苗安宁³ 李学云³ 王 洋⁴

(1. 莱西市自然资源局, 山东 青岛 266699; 2. 南水北调中线信息科技有限公司, 北京 100038; 3. 青岛农业大学, 山东 青岛 266109; 4. 山东正元地质资源勘查有限责任公司地质环境研究院, 山东 济南 250101)

摘要 以国内常见的4个菊花 *Dendranthema morifolium* 栽培品种为试验材料, 研究干旱胁迫下不同品种菊花的抗旱能力。结果表明: 干旱胁迫下, 4个菊花的气孔面积差异不显著, 气孔密度、叶片厚度、栅栏组织和角质层厚度存在着显著差异, 叶片总含水量、自由水含量、相对含水量和束缚水含量也存在显著差异。随胁迫强度的增加, 叶片质膜透性持续增大, 而叶绿素含量持续下降, 4个菊花品种叶片内过氧化物酶的含量都随着干旱胁迫的增加呈现先升高后降低的趋势, “梦幻”的MDA含量在干旱胁迫下的变化不大, “红星”、“雪雁”、“落金钱”的MDA含量一直增加。隶属函数法综合评价4品种菊花抗旱性大小顺序为“雪雁” > “落金钱” > “红星” > “梦幻”。

关键词 菊花; 干旱胁迫; 生理响应; 抗旱性

中图分类号: S722.5 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2023) 01-0081-09

Physiological Response and Drought Resistance Evaluation of Four *Dendranthema morifolium* under Drought Stress

ZHANG Mingxiao¹ YU Senmiao² MIAO Anning³
LI Xueyun³ WANG Yang⁴

(1. Laixi Bureau of Natural Resources, Qingdao, Shandong 266699, China; 2. Information Technology Co., Ltd of South-to-North Water Diversion Middle Route Project, Beijing 100038, China; 3. Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109, China; 4. Geological Environment Research Institute of Shandong Zhengyuan Geological Resources Exploration Co. Ltd., Jinan, Shandong 250101, China)

Abstract To study the drought resistance of different varieties of chrysanthemum under drought stress, four common *Dendranthema morifolium* were used as experimental materials. The results showed that there was no significant difference in the stomatal area among the four *D. morifolium* under drought stress. There were significant differences in stomatal density, leaf thickness, palisade tissue and cuticle thickness. There were also significant differences in total water content, free water content, relative water content and bound water content of leaves. With the increase under stress intensity, the membrane permeability of leaves continued to increase, while the chlorophyll content continued to decrease. The content of peroxidase in the leaves of four *D. morifolium* varieties increased first and then decreased with the increase of drought stress. The MDA content of “Menghuan” did not change much under drought stress, and the MDA content of “Hongxing”, “Xueyan” and “Luojinqian” had been increasing. The order for drought resistance of four varieties of chrysanthemum was “Xueyan” >

* 基金项目: 露天矿绿色矿山建设中矿山地质环境治理植物适应性试验资助项目 (6602421063)。

第一作者: 张明晓 (1975—), 男, 工程师, 主要从事林业资源管理与开发利用工作, E-mail: 121815532@qq.com。

通信作者: 王洋 (1984—), 女, 高级工程师, 主要从事园林植物应用与生态研究, E-mail: wy-84425@163.com。

“Luojinqian” > “Hongxing” > “Menghuan” by comprehensive evaluation of the membership function method. The results provided a theoretical basis for the selection of drought-resistant varieties of *D. morifolium*.

Key words *Dendranthema morifolium*; drought stress; physiology response; drought resistance

菊花 *Dendranthema morifolium* 是原产于我国的菊科菊属多年生宿根草本植物^[1], 是我国传统十大名花之一, 种质资源极其丰富, 在我国乃至世界的花卉市场中一直占有着重要的主导地位^[2]。我国菊花有着近 3 000 年的栽培和种植历史, 菊花的品种和栽培资源极其丰富, 栽培品种繁多, 在我国逐渐形成了浓郁的菊花特色和文化^[3]。目前, 随着全球气候变暖, 环境恶化, 干旱连年频发, 干旱胁迫已成为限制菊花应用的瓶颈之一, 而关于干旱胁迫对菊花叶片生理指标影响的研究较少^[4]。

植物响应干旱胁迫的直接器官就是叶片, 叶片的解剖结构是植物抗旱性综合评价的一个重要指标, 通常来说叶片表皮层发达、内部结构紧密等特征是植物抗旱性较强的表现^[5]。气孔调节基质和渗透调节基质能够稳定植物体的渗透压来响应干旱胁迫, 此外, 抗氧化防御系统和诱导保护蛋白等机制共同响应逆境的损伤^[5]。植物进行渗透调节物质的积累和抗氧化能力的提高是抵御植物干旱胁迫的重要途径^[6]。

当前, 关于菊花的研究主要集中在起源与品种演化, 品种的分类鉴定以及种质资源的评价方面^[6]。菊花抗逆性的研究主要集中在抗病虫害、耐寒和耐热等方面^[7-9], 但是关于菊花耐旱性的研究较少。袁晓晶^[10]从解剖学方面对 6 个品种的菊花抗旱性进行了研究, 表明菊花具有较强的抗旱性。本研究通过测定 4 个菊花品种的叶片解剖结构及生理指标, 并对其抗旱性进行评价, 以期对菊花抗旱品种的筛选以及在干旱地区园林绿化中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在青岛农业大学大棚内进行, 选取菊花“梦幻”、“红星”、“雪雁”、“落金钱”4 个品种为研究对象, 选择无病虫害健康植株, 栽植于塑料花盆中(上口径为 20 cm, 下口径为 18 cm), 基质为草炭、珍珠岩和蛭石按照等比例进行配比。

1.2 实验设计

试验设置 3 个干旱处理, 分别为正常供水 FA

(田间持水量的 70%~75%)、轻度干旱 HD (田间持水量的 50%~55%)、重度干旱 MD (田间持水量的 40%~45%), 每个处理 10 株, 3 次重复。苗长至 10 片真叶时, 选择生长一致的植株进行抗旱胁迫处理, 采取称重法定期补水, 持续处理一个月后统一时间取样并进行相关生理指标及形态指标测定。样品采集后立即将样品用液氮冷冻后置于 -80℃ 保存, 用于测定各项生理指标。

1.3 叶片解剖及生理指标测定

分别选取 3~5 盆长势一致植株, 选取顶端向下第 3、4 片功能叶进行剪取, 进行叶片结构观察, 取样时间为早上 10:00—11:00 时, 选取叶片中部位置放在 4% 戊二醇固定液进行固定, 材料固定完毕, 保存于加盖的容器内, 抽气, 贴上标签。参考陈书明^[11]方法测定以下指标: 气孔面积、气孔密度、叶片厚度、栅栏组织厚度以及角质层厚度等。生理指标测量参考郭燕^[12]的方法测定以下指标: 叶绿素、可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸、细胞膜透性、丙二醛、超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶。

1.4 数据处理

采用隶属函数法对不同菊花品种进行抗旱性综合评价, 采用灰色关联法计算品种与各指标的关联系数^[13], 具体计算方法为: (1) 建立灰色系统, 以各品种的平均隶属函数值组成参考函数序列, 记为 X_0 , $X_0 = \{x_0(k) | k=1, 2, \dots, 4\}$, 以各品种各个指标的平均值为比较数列, 记为 $X_i (i=1, 2, \dots, 4)$, $X_i = \{x_i(k) | k=1, 2, \dots, 4\}$, ($i=1, 2, \dots, 21$) 分布代表各个测试指标^[14]。(2) 采用内插法将比较数列无量纲化。(3) 计算关联系数与关联度。具体计算公式如下:

$$() \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)|},$$

($i=1, 2, \dots, 21; k=1, 2, \dots, 4$)。

其中, ε 为分辨系数, 一般取 0.5, 关联度的

的计算公式如下: $y_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^n \varepsilon_i(k), (i=1, 2, \dots, 21)$ 利用 Microsoft Excel 2010、SPSS 22.0 和 GraphPad Prism 8 软件对数据分析和作图分析^[15]。

2 结果与分析

2.1 形态表现

采集 4 种菊花叶片并对其解剖结构进行观测分析（表 1），结果表明 4 种菊花的气孔面积差异不显著，气孔密度、叶片厚度、栅栏组织和角质层厚度等则呈现出显著差异（ $P<0.05$ ）。以“红星”的气孔面积最小，为 $21.96\text{ }\mu\text{m}^2$ ，“雪雁”的最

大，为 $23.06\text{ }\mu\text{m}^2$ ，除此之外，在气孔密度、叶片厚度、栅栏组织厚度和角质层厚度均表现出“落金钱” $>$ “雪雁” $>$ “红星” $>$ “梦幻”，“梦幻”品种除了气孔面积外均显著低于其它品种。

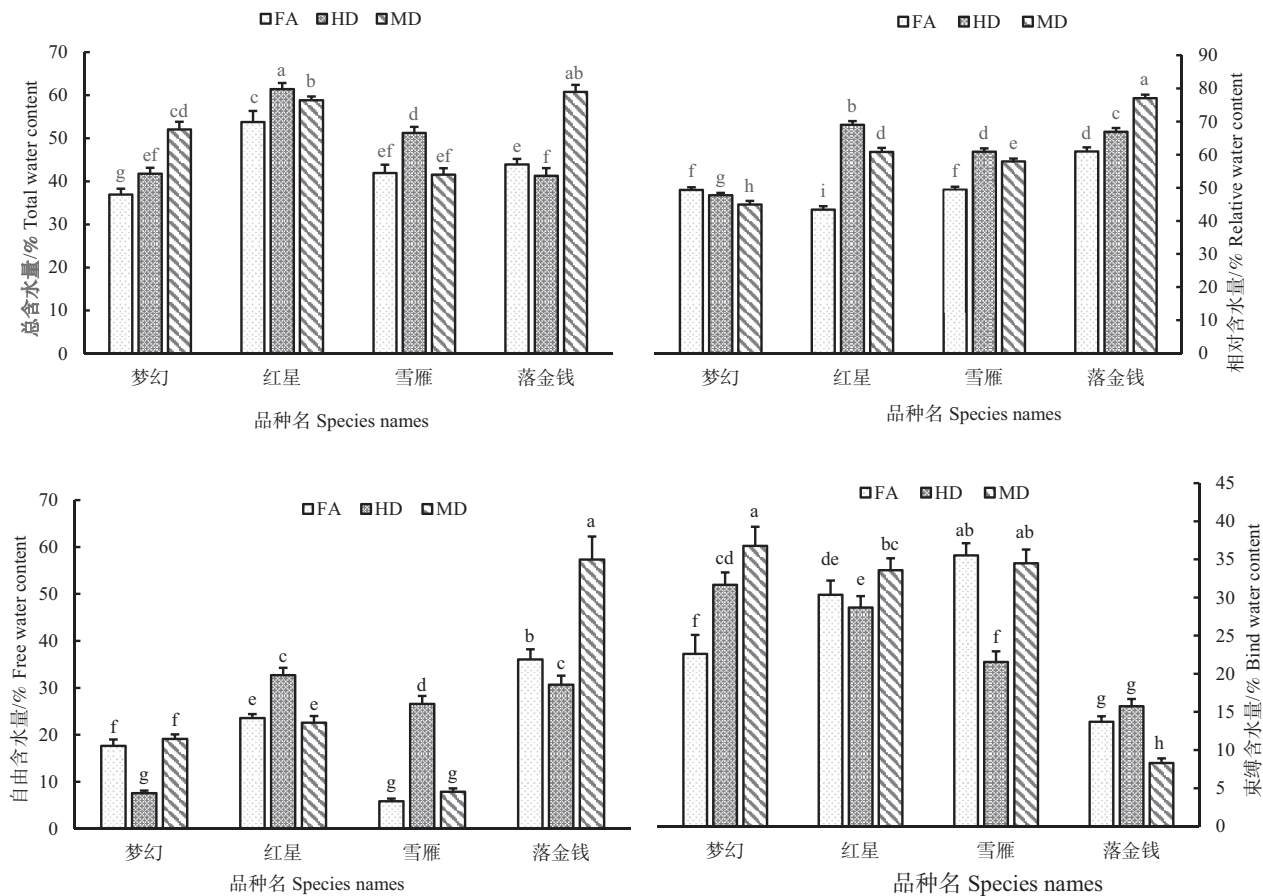
2.2 不同程度干旱胁迫对生理生化指标的影响

2.2.1 叶片水分含量 随着干旱胁迫程度的加剧，4 种菊花品种的叶片中水分的含量存在着显著差异（ $P<0.05$ ，图 1）。其相对含水量变化量最小的为

表 1 4 种菊花相对的形态表现
Tab. 1 Relative morphological performance of four *D. morifolium*

品种 Variety	气孔面积/ μm^2 Stomatal area	气孔密度/ (个· mm^{-2}) Stomatal density	叶片厚度/ μm Blade thickness	栅栏组织厚度/ μm Fence tissue thickness	角质层厚度/ μm Thickness of the stratum corneum
“梦幻”	$22.74 \pm 1.71\text{a}$	$22.21 \pm 2.05\text{d}$	$21.96 \pm 0.54\text{c}$	$23.26 \pm 2.47\text{d}$	$22.81 \pm 1.26\text{d}$
“红星”	$21.96 \pm 0.54\text{a}$	$87.06 \pm 2.38\text{b}$	$105.84 \pm 2.45\text{b}$	$120.78 \pm 2.89\text{c}$	$124.35 \pm 2.45\text{c}$
“雪雁”	$23.06 \pm 0.81\text{a}$	$95.07 \pm 1.89\text{b}$	$108.13 \pm 2.09\text{b}$	$128.79 \pm 1.68\text{b}$	$140.18 \pm 2.39\text{b}$
“落金钱”	$22.18 \pm 1.88\text{a}$	$105.59 \pm 3.56\text{a}$	$118.39 \pm 2.13\text{a}$	$137.42 \pm 2.13\text{a}$	$150.66 \pm 0.82\text{a}$

注：不同字母表示处理间差异达到 5% 显著水平（ $P < 0.05$ ）。
Note: Different letters indicate that the difference between treatments reaches the 5% level of significance（ $P < 0.05$ ）.



注：不同字母表示处理间差异达到 5% 显著水平（ $P < 0.05$ ）。
Note: Different letters indicate that the difference between treatments reaches the 5% level of significance（ $P < 0.05$ ）.

图 1 干旱胁迫对 4 个菊花品种叶片水分含量的影响
Fig.1 Effects on leaf water content in four *D. morifolium* under drought stress

“梦幻”，在轻度干旱下的相对含水量变化幅度仅为2%，在重度干旱处理下为5.32%。“红星”、“雪雁”、“落金钱”在轻度处理下则分别为56.64%、27.72%、5.79%。在重度干旱处理下相对含水量变化幅度分别为39.15%、20.70%、22.87%。说明以上4种菊花可通过降低叶片含水量来响应干旱胁迫，但其调控叶片相对含水量的能力不同。

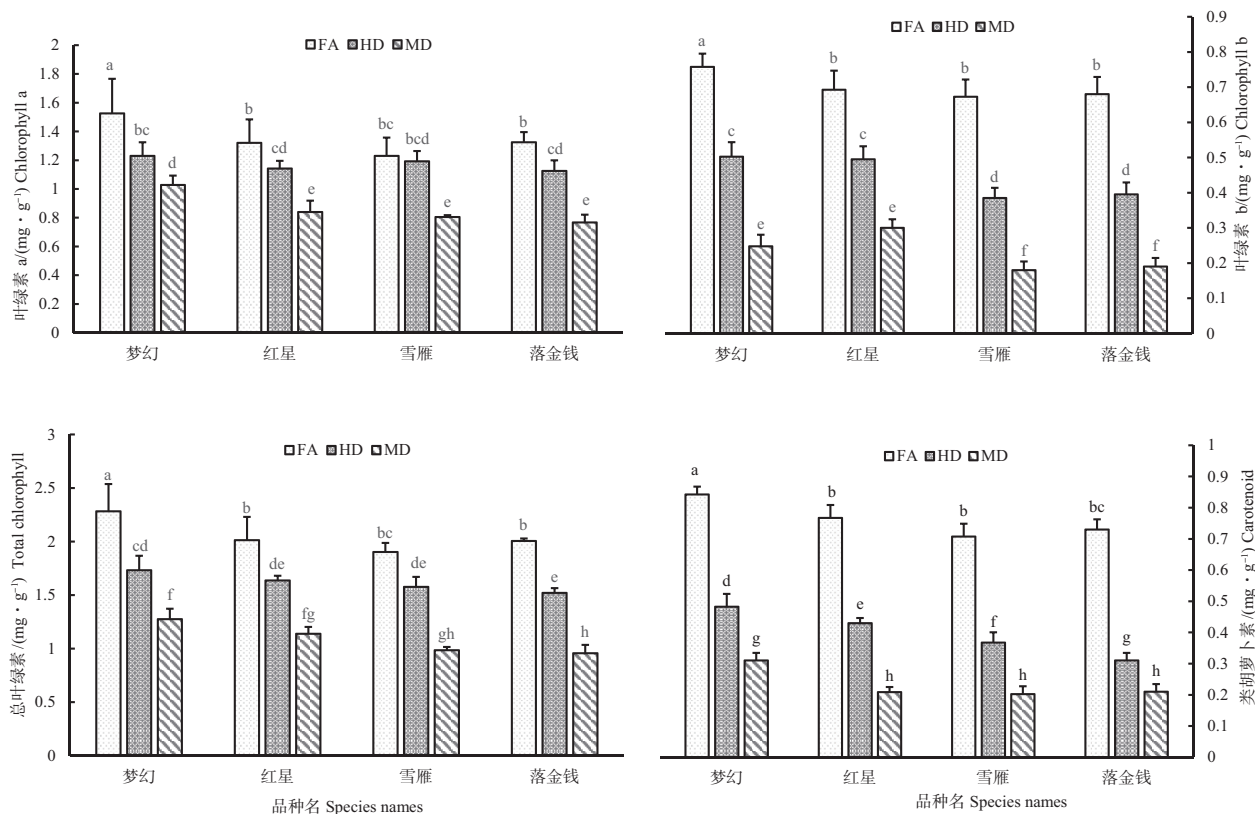
其自由含水量则均呈现显著性差异，“梦幻”与“落金钱”的自由含水量变化幅度均随着干旱胁迫的加剧先减少后增加的趋势，正常供水条件下的自由水含量分别为17.63%和36.04%，轻度干旱下两个品种的自由水含量为7.57%和30.68%，重度干旱下分别为19.11%和57.34%，“红星”与“雪雁”则随着干旱胁迫的加剧先增加后减少。且在重度干旱处理下“落金钱”相较于其他3个品种的菊花，其叶片内自由含水量变化对比正常供水处理下的变化更大。

随着干旱胁迫的加剧，其叶片内的束缚含水量的变化也呈现出较大差异，随着干旱胁迫的加剧，“梦幻”叶片内的束缚含水量分别为22.6%，

31.67%和36.78%，“落金钱”叶片内的束缚含水量先增加后减少，分别为13.71%，15.74%和8.29%，而“红星”与“雪雁”叶片内的相对含水量则先减少后增加最后逐渐恢复到与正常供水组相近。重度干旱胁迫处理下4个品种的束缚含水量相较于正常供水组处理下的变化幅度分别为61.82%、3.06%、2.19%、33.21%。

2.2.2 叶片叶绿素和类胡萝卜素质量分数 干旱胁迫下，4个菊花品种叶片叶绿素和类胡萝卜素质量分数之间存在着显著差异 ($P < 0.05$, 图2)，随着干旱胁迫的加剧，4个品种叶片内叶绿素a和叶绿素b的含量均呈现逐渐减少的趋势，总的叶绿素含量随着干旱胁迫增加呈现出减少趋势，其降低幅度较大且大致相同，当达到重度干旱处理时其变化幅度分别为45.26%、40.49%、46.16%、51.50%。

随着干旱胁迫增强4种菊花品种叶片内的类胡萝卜素含量也随之发生变化，其在轻度干旱处理下类胡萝卜素变化幅度分别相较于正常供水组处理下为42.36%、43.43%、48.58%、57.54%。在重度干旱处理下4种菊花品质叶片内的类胡萝卜素含量变



注：不同字母表示处理间差异达到5%显著水平 ($P < 0.05$)。

Note: Different letters indicate that the difference between treatments reaches the 5% level of significance ($P < 0.05$).

图2 干旱胁迫对4个菊花品种叶绿素和类胡萝卜素的影响

Fig. 2 Effects on chlorophyll and carotenoid in four *D. morifolium* under drought stress

化幅度分别为 60%、73.16%、70%、71.24%。

2.2.3 叶片渗透调节物质 随着干旱胁迫的加剧,可溶性糖含量呈上升趋势(图 3)，“梦幻”、“雪雁”、“落金钱”的可溶性蛋白含量呈先降低后增加,重度干旱条件下“梦幻”可溶性蛋白含量最低,为 $4.60 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ，“落金钱”可溶性蛋白含量最高,为 $17.50 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ，其中降低幅度为“梦幻” > “雪雁” > “落金钱”，分别为对照条件的 46.85%、66.72%、86.20%，增加幅度为“梦幻” > “落金钱” > “雪雁”，其中重度干旱处理下的含量分别为正常供水的 62.03%、71.96%、100.7%。而“红星”恰恰相反,呈现先增后降的趋势,最低为 $3.61 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ，最高为 $21.67 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。干旱胁迫下,“梦幻”和“红星”的脯氨酸含量均显著高于正常供水,轻度干旱条件下“落金钱”的脯氨酸含量 ($17.63 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) 低于对照组 ($19.74 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)，但是重度干旱条件下其脯氨酸含量 ($25.51 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) 高于正常供水。

植物在受到干旱胁迫后,会对抗氧化系统产生影响^[16]，研究发现不同程度的干旱胁迫下菊花各种品种间的 MDA 含量呈现显著性差异,其中“梦幻”品种在干旱胁迫下 MDA 的含量变化不大,变化范围为 $0.14 \sim 0.15 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ ，“红星”、“雪雁”、“落金钱”的 MDA 含量一直增加。但是 3 个处理下最后其含量都是“梦幻” > “红星” > “落金钱” > “雪雁”。

2.2.4 叶片质膜稳定性和活性氧代谢 随着干旱胁迫的加剧,其细胞膜透性均会发生改变,随着干旱胁迫加大,“梦幻”、“红星”、“落金钱”的细胞膜透性逐渐变大,最大为 29.42% (图 3)。而“雪雁”的叶片细胞膜透性则呈现先增加后减小的趋势,最小为 11.17%，最大为 12.18%，随着干旱胁迫的不断增加,当最终达到重度干旱处理条件的时候,“雪雁”的细胞膜透性会基本恢复到正常水平。

随着干旱胁迫的增加,叶片中的 SOD、POD 和过氧化氢酶含量也发生了显著变化(图 4),随着干旱胁迫增大,“梦幻”、“雪雁”、“落金钱”叶片内的 SOD 含量呈现出逐渐增加趋势,其中“雪雁”叶片 SOD 含量最高,为 $243.79 \text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ，“红星”叶片中的 SOD 含量呈现出减少趋势,最低为 $82.25 \text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ，其在重度干旱处理下 SOD 的含量分别为正常供水处理下的 65.87%、186.47%、176.58%、269.08%。

其叶片内的 POD 含量也会发生变化,当

在轻度处理下时,4 种菊花品种的 POD 含量均增加,其中“落金钱”的 POD 含量最高,为 $72.60 \text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ，4 个品种的增加幅度分别为 48.08%、109.21%、210.83%、45.99%。当干旱胁迫继续增加时,4 种菊花品质叶片内的过氧化物酶则大致恢复到正常水平。

“红星”、“雪雁”、“落金钱”叶片内过氧化氢的含量随着干旱胁迫的加剧呈现先减少后增加的趋势,“梦幻”叶片内的过氧化氢含量则随着干旱胁迫的加剧一直减少,最小值为 $6.00 \text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。当达到重度干旱处理条件时,其叶片内过氧化氢的含量分别为正常状态下的 59.47%、34.49%、79.57%、85.98%。

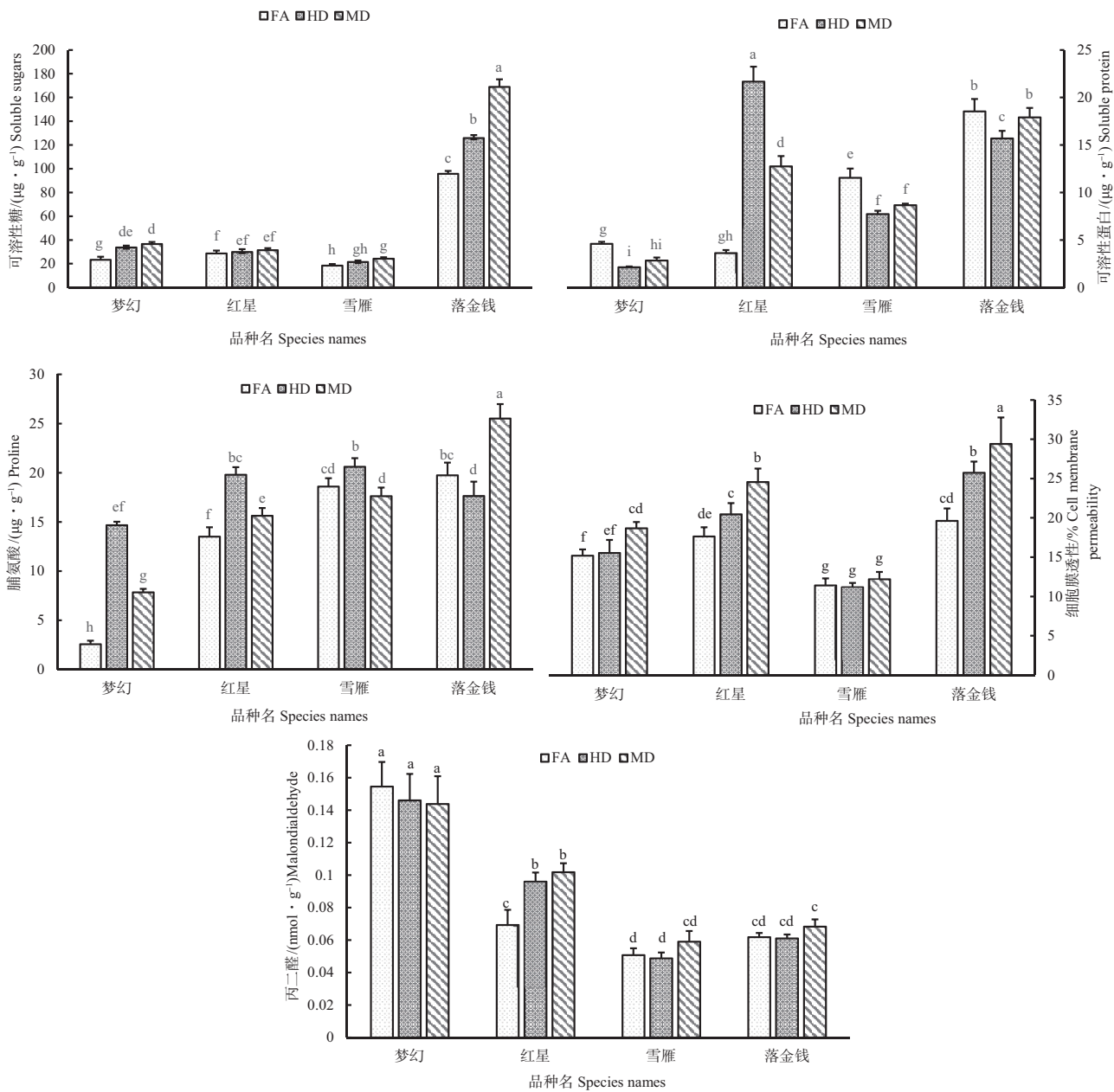
2.3 抗旱性综合评价

2.3.1 菊花各生理指标与抗旱性的关联度 由表 2 可得:与菊花抗旱性关联度最大的 3 个生理指标分别为栅栏组脯氨酸、叶片相对含水量,对应的相关度为 0.902, 0.894, 0.851, 相关度接近 0.900。

表 2 菊花各生理指标与抗旱性的关联度

Tab. 2 Correlation between physiological indexes and drought resistance of *D. morifolium*

抗性相关指标 Resistance-related indicators	关联系数 Correlation coefficient	排序 Sort
丙二醛	0.413	21
超氧化物歧化酶	0.462	20
过氧化氢	0.764	5
过氧化物酶	0.495	19
角质层厚度	0.807	4
可溶性蛋白	0.663	10
可溶性糖	0.624	12
类胡萝卜素	0.507	17
脯氨酸	0.894	2
气孔密度	0.647	11
气孔面积	0.721	7
束缚水含量	0.504	18
细胞膜透性	0.557	15
相对含水量	0.851	3
叶绿素 a	0.582	13
叶绿素 b	0.510	16
叶片厚度	0.751	6
栅栏组织厚度	0.902	1
自由水含量	0.674	9
总含水量	0.688	8
总叶绿素	0.562	14



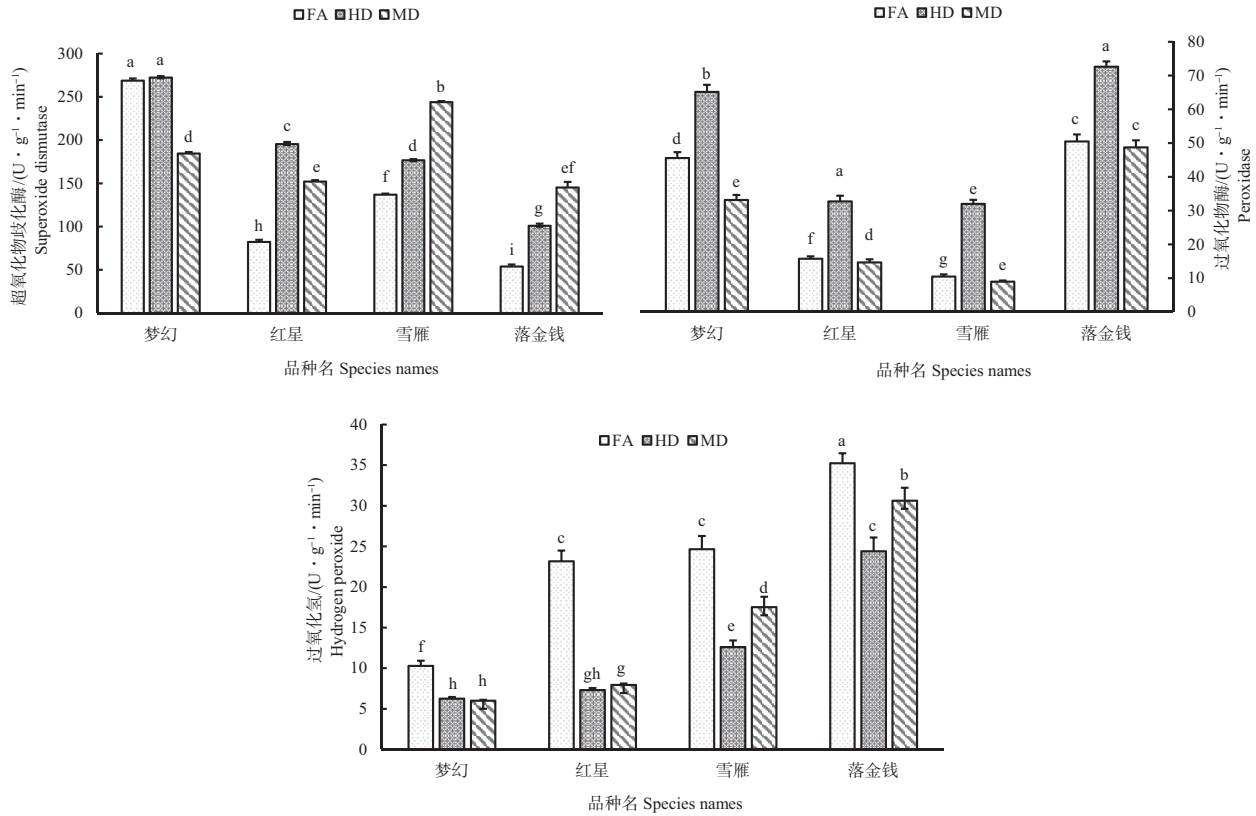
注：不同字母表示处理间差异达到 5% 显著水平 ($P < 0.05$)。
Note: Different letters indicate that the difference between treatments reaches the 5% level of significance ($P < 0.05$).

图 3 干旱胁迫对 4 个菊花品种叶片渗透调节物质的影响
Fig. 3 Effects on leaf osmotic adjustment substance in four *D. morifolium* under drought stress

2.3.2 抗旱性综合评价 植物抗旱性是一个复合性状，单一指标并不能说明抗旱性强弱，以平均隶属函数值作为菊花抗旱性强弱综合评价标准，平均值越大说明抗旱性越强，由表 3 可知，4 个菊花品种的抗旱能力从大到小为“雪雁” > “落金钱” > “红星” > “梦幻”。

表 3 干旱胁迫对 4 个菊花品种生理指标平均隶属函数值
Tab. 3 The average membership function values of drought stress on physiological indexes of four *D. morifolium* cultivars

品种 Species names	平均隶属函数值 The average membership function values
“梦幻”	0.468
“红星”	0.475
“雪雁”	0.605
“落金钱”	0.517



注：不同字母表示处理间差异达到 5% 显著水平 ($P < 0.05$)。

Note: Different letters indicate that the difference between treatments reaches the 5% level of significance ($P < 0.05$).

图 4 干旱胁迫对 4 个菊花品种叶片质膜稳定性和活性氧代谢的影响

Fig. 4 Effects on leaf plasma membrane stability and reactive oxygen species metabolism in four *D. morifolium* under drought stress

3 结论与讨论

叶片相对含水量是衡量植物耐旱能力的重要生理指标，反映植物组织水分亏损程度^[17]，随着干旱胁迫的加剧，“梦幻”品种叶片内的束缚含水量一直增加，“落金钱”叶片内的束缚含水量一直减少，而“红星”与“雪雁”叶片内的相对含水量则先减少后增加最后逐渐恢复到与对照组相近。4 个菊花品种随着干旱程度的增加，叶片相对含水量总体呈上升趋势，但“梦幻”品种在中干旱时有略微下降，这可能是由于其为适应干旱环境而降低了对土壤水分的吸收并增加组织水分的亏损有关。叶绿素是光合作用过程中最重要的光合色素，干旱胁迫会抑制叶绿素的合成并加快叶绿素的分解^[18]，单长卷研究表明，随着干旱胁迫程度的加剧，抗旱小麦品种“洛麦 9133”叶片的叶绿素含量逐渐降低，随着土壤水分的降低叶绿素含量减少，从而影响到叶绿体对光能的吸收和转化

能力，导致净光合速率水平呈下降趋势^[19]。本研究发现，4 个菊花品种的叶绿素总含量都呈下降趋势，说明随着干旱程度的增加，菊花的光合产量不断减少，研究结果与单长卷的结果一致^[19]。其中，“梦幻”和“落金钱”品种指标下降比较明显，说明了这两个品种的抗旱性可能相对较弱。表明了菊花叶片受到干旱胁迫时，叶绿素合成开始慢慢的受阻，随着干旱程度的增加叶片叶绿素的分解也加快，4 个菊花品种都在重度干旱时叶绿素含量达到最低。

何开跃等^[20]研究表明，MDA 含量与质膜相对透性具有相关性，是判断植物受伤害程度的重要指标，MDA 含量升高越快，植物的抗逆能力越弱。Dhidsa 等^[21]研究表明，在干旱胁迫条件下，保护酶系统活性的上升和下降，与植物品种的抗旱性强弱有关，酶活性越高，消除自由基及活性氧的能力就越强，植物的抗逆性也越强。“红星”在轻度干旱时就有较大幅度增长，说明“红

星”在轻度干旱时叶片细胞膜受损最大；并且“梦幻”品种在干旱胁迫下MDA的含量变化不大，说明“梦幻”品种本身有一定的抗旱性。干旱胁迫可导致细胞代谢紊乱，使植物体内活性氧积累，植物将主动调动抗氧化酶类SOD、POD等来清除体内的活性氧，以保护细胞膜不受活性氧的攻击^[22]。SOD清除植物体内多余的超氧阴离子，而POD和CAT则清除活性氧物质并减轻膜脂过氧化造成的伤害，维持植物体内的活性氧离子代谢的动态平衡^[23]，所以SOD、POD、CAT是衡量植物抗旱性的关键指标。有研究表明栓皮栎 *Quercus variabilis*、甘蔗 *Saccharum officinarum*、冰草 *Agropyron cristatum*、狼尾草 *Pennisetum alopecuroides*、杉木 *Cunninghamia lanceolata* 叶片，SOD、POD、CAT活性随干旱胁迫程度的增加而增强^[24-28]。本研究发现，随着干旱梯度的增加，4个菊花品种的POD活性均呈现出先上升后降低的趋势，达到峰值的阶段均在轻度干旱，其后随着干旱程度的增加而受到抑制，呈现下降的趋势。“梦幻”、“红星”的SOD活性呈现先上升后降低的趋势，而“雪雁”和“落金钱”的SOD活性则呈现一直升高的趋势。不同品种的SOD活性水平不一样且比POD和CAT活性高，其中“雪雁”POD活性平均水平表现为最高，后是“红星”、“落金钱”、“梦幻”，说明了在受到干旱胁迫时，POD对菊花的抗旱性起主要作用且不同品种的POD作用也有较大差异。

综上所述，在干旱胁迫下菊花可以提高增加渗透调节物质和抗氧化酶的活性等措施来降低干旱胁迫所产生的伤害，但在重度干旱时，超出了菊花的耐性阈值，会出现降低情况，这与大多数植物抗逆研究结果一致^[24-28]。叶绿素含量指标在轻度干旱时就出现下降的情况，说明干旱会直接影响菊花体内叶绿素的含量，叶绿素b和类胡萝卜素含量尤为明显；而菊花的细胞膜透性呈上升趋势，说明干旱对菊花细胞膜系统有着较大的影响。干旱胁迫条件下，不同的菊花品种表现出不同差异，抗旱性强的菊花品种主要表现在根系活力、叶绿素含量及抗氧化酶活性上，比如抗旱性较强的“雪雁”根系活力明显高于抗旱性弱的“梦幻”，SOD活性也明显高于其他3个品种，但从渗透调节物质的研究结果来看，“梦幻”的抗旱性要强一些，与品种间抗旱性强弱的结果不符，

这说明了以单一指标当作判定标准来进行菊花抗旱性综合评价是不准确的，应使用隶属函数法，对不同品种菊花的多种指标参数进行综合评价，得出结果。本研究采用隶属函数法对4个品种菊花的抗旱能力进行综合评价，结果显示“雪雁”>“落金钱”>“红星”>“梦幻”，“雪雁”的抗旱性最强，“梦幻”的抗旱性最弱。模糊数学综合隶属函数分析是在多指标测定基础上对材料特性进行综合评价，可以提高抗旱性筛选的可靠性，贾俊香，刘松涛、张微等^[29-31]用同样的方法对多种苗木抗旱性进行了鉴定分析，也说明了这种方法具有一定的适用性。

参考文献

- [1] 毛洪玉, 祝朋芳, 何小雨. 地被菊的抗寒性和光照栽培试验[J]. 辽宁农业科学, 2004, 22(4): 46-48.
- [2] 李云, 张钢, 杨际双. 热激锻炼对高温胁迫下菊花生理代谢的影响[J]. 武汉植物学研究, 2008, 26(2): 175-178.
- [3] 刘花梅, 戴瑞平, 杨梅, 等. 代用茶菊花镉含量特征及镉健康风险评价[J]. 现代食品, 2018, 12(15): 81-87.
- [4] 马丽, 侯振安, 梁永超, 等. NaCl胁迫对棉花幼苗生理特性的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2008, 26(2): 180-184.
- [5] 赖金莉, 李欣欣, 薛磊, 等. 植物抗旱性研究进展[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(17): 23-27.
- [6] 栗燕, 黎明, 袁晓晶, 等. 干旱胁迫下菊花叶片的生理响应及抗旱性评价[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2011, 29(1): 5-10.
- [7] 陈煜. 菊花近缘种属植物抗寒性评价及抗寒分子机制研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- [8] 吴盼婷, 王江民, 沈佳逾, 等. 不同菊花品种根系、地上部和叶片相关指标分析及抗逆性评价[J]. 植物资源与环境学报, 2017, 26(2): 46-54.
- [9] 李云, 杨际双, 张钢. 热激锻炼诱导菊花耐热性研究[J]. 西北植物学报, 2007, 27(10): 2041-2045.
- [10] 袁晓晶. 六个品种菊花的抗旱性研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2009.
- [11] 陈书明. 欧李抗旱耐盐的生理机制研究与快速繁殖体系的建立[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2008.
- [12] 郭燕. 模拟干旱胁迫下葡萄的抗旱生理生化机理研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [13] 陈志成, 王志伟, 王荣荣, 等. 3种阔叶树种对持续干旱的生理响应及抗旱性评价[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(2): 65-71.

- [14] 王琼, 宋桂龙, 韩烈保. 5种野生护坡植物的抗旱综合性评价[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2008, 37(2): 153-157.
- [15] HANSON A D, NELSEN C E, EVERSON E H. Evaluation of free proline accumulation as an index of drought resistance using two contrasting barley cultivars1[J]. Crop Science, 1977, 15(17): 720-726.
- [16] HODGES D M, JOHN M, CHARLES F, et al. Improving the thiobarbituric acid-reactive-substances assay for estimating lipid peroxidation in plant tissues containing anthocyanin and other interfering compounds[J]. Planta berlin, 1999, 207(4): 604-611.
- [17] 王佳嵩, 王健恩, 罗先强, 等. 3种华南乡土地被植物的耐旱性研究[J]. 林业与环境科学, 2020, 36(1): 91-98.
- [18] OGREN E. Evaluation of Chlorophyll Fluorescence as a Probe for Drought Stress in Willow Leaves [J]. Plant Physiology, 1990, 93(4): 1280-1285.
- [19] 单长卷. 土壤干旱对抗旱品种洛麦9133拔节期生理特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2007, 27(5): 880-883.
- [20] 何开跃, 李晓储, 黄利斌, 等. 干旱胁迫对木兰科5树种生理生化指标的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2004, 13(4): 20-23.
- [21] DHINDSA A S, MUTOUE W. Drought tolerance in two mosses: Correlated with enzymatic defense against lipid peroxidation[J]. J Exp Bot, 1981(32): 79-91.
- [22] 李钦夫, 李征明, 纪建伟, 等. 叶绿素荧光动力学及在植物抗逆生理研究中的应用[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(22): 5399-5402.
- [23] NAYA M J, PEREBOOM D, ORTEGO J, et al. Superoxide anion produced by inflammatory cells play an important part in the pathogenesis of acid and pepsin induced esophagitis in rabbits[J]. Gut, 1997, 40(2): 175-181.
- [24] 崔豫川, 张文辉, 李志萍. 干旱和复水对栓皮栎幼苗生长和生理特性的影响[J]. 林业科学, 2014, 50(7): 66-73.
- [25] 吴凯朝, 黄诚梅, 邓智年, 等. 干旱后复水对甘蔗伸长期生理生化特性的影响[J]. 南方农业学报, 2015, 46(7): 1166-1172.
- [26] 高悦, 朱永铸, 杨志民, 等. 干旱胁迫和复水对冰草相关抗性生理指标的影响[J]. 草地学报, 2012, 20(2): 336-341.
- [27] 崔豫茹, 于慧敏, 李会彬, 等. 干旱胁迫及复水对狼尾草幼苗生理特性的影响[J]. 草业科学, 2017, 34(4): 788-793.
- [28] 刘伟新, 郑会全, 胡德活, 等. PEG6000模拟水分胁迫对杉木家系苗木生理生化指标的影响[J]. 林业与环境科学, 2018, 34(2): 19-24.
- [29] 贾俊香, 贾炜珑. 转基因玉米苗期抗旱性生理生化指标及综合评价的研究[J]. 山西农业大学学报, 2005, 25(4): 331-333.
- [30] 刘松涛, 赵喜茹, 曹雯梅. 应用模糊数学法综合评判旱地小麦新品种[J]. 安阳工学院学报, 2008, (4): 94-96.
- [31] 张微, 李春艳, 曹连莆, 等. 春性小黑麦材料抗旱性的比较研究[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2009, 27(5): 529-535.