

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第8期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.08.012

论文标题： 蝴蝶兰对干旱胁迫的生理响应及其耐旱性评价

作　　者： 司宝华，张丽娟，阿丽米热·吾布力，等

收稿日期： 2025-07-17

引文格式： 司宝华,张丽娟,阿丽米热·吾布力,等.蝴蝶兰对干旱胁迫的生理响应及其耐旱性评价[J].中南林业科技大学学报,2026,46(8):120-129.

Si B H, Zhang L J, Alimire·Wubuli, et al. Physiological response of *Phalaenopsis* to drought stress and its drought tolerance evaluation[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(8):120-129.

相关论文推荐

Recommended articles

培养基和添加物对蝴蝶兰原球茎分化幼苗的影响

The effect of culture media and organic compounds on the differentiation of *Phalaenopsis* PLB

干旱胁迫下基质和保水剂对3种景天属植物生长和生理的影响

Effects of substrate and water retaining agent on the growth and physiology of three *Sedum* plants under drought stress

干旱胁迫下保水剂对3种扶芳藤生长和生理特性的影响

Effects of water retaining agent on physiological characteristics of three *Euonymus* plants under drought stress

干旱对不同种源花榈木幼苗生长及生理生化的影响

Effects of drought on growth and physiological and biochemical characteristics of seedlings of *Ormosia henryi* from different provenances

柚木无性系苗期抗旱生理评价与选择的研究

Drought stress physiological estimate and early selection of *Tectona grandis* clones at seedling stage

干旱胁迫对4种木兰科树种生理特性的影响

Effects of drought stress on physiological characteristics of four Magnoliaceae species

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.08.012 http: //qks.csuft.edu.cn

蝴蝶兰对干旱胁迫的生理响应及其耐旱性评价

司宝华[1]，张丽娟[1]，阿丽米热·吾布力[2]，吕明皓[1]，马文舒[1]，刘海娟[1]，董 飞[3]

（1. 宁夏农林科学院园艺研究所，宁夏 银川 750021；2. 宁夏大学 林业与草业学院，宁夏 银川 750021；
3. 山东省农业科学院休闲农业研究所，山东 济南 250100）

摘 要：【目的】探究蝴蝶兰对干旱胁迫的生理响应，筛选耐旱品种，加速耐旱蝴蝶兰品种的选育进程，满足干旱地区市场需求，提升经济效益。【方法】选取 11 个蝴蝶兰品种，在浇水后自然干旱，研究其光合参数、叶绿素荧光特性及生理指标变化规律，并运用隶属函数法和聚类分析法筛选耐旱品种。【结果】随着含水量下降，大部分品种的净光合速率、叶绿素荧光参数和叶绿素含量持续下降，胞间 CO_2 浓度、电导率、可溶性糖含量和丙二醛含量持续上升，CAT、SOD 活性和可溶性蛋白含量呈现先上升后下降的趋势。基于隶属函数法构建的耐旱性评价体系显示，各品种耐旱性表现为‘金公主’＞‘迪奥’＞‘日升’＞‘金叶咖啡’＞‘拉斯维加斯’＞‘安娜’＞‘贝瑞王子’＞‘红酒’＞‘恭喜发财’＞‘满天红’＞‘梦幻女郎’。聚类分析结果显示，将 11 个品种的蝴蝶兰按照耐旱性强弱分为 2 类：第 1 类为耐旱品种，分别是‘金公主’‘迪奥’‘日升’‘金叶咖啡’‘拉斯维加斯’和‘安娜’；第 2 类为一般品种，分别为‘贝瑞王子’‘红酒’‘恭喜发财’‘满天红’和‘梦幻女郎’。【结论】‘金公主’‘迪奥’‘日升’‘金叶咖啡’‘拉斯维加斯’和‘安娜’能适应宁夏的干旱气候，适合在宁夏推广种植；‘贝瑞王子’‘红酒’‘恭喜发财’‘满天红’和‘梦幻女郎’在宁夏干旱区可能需要频繁浇水，成本较高，应适当种植。

关键词：蝴蝶兰；干旱胁迫；生理；隶属函数；耐旱性评价

中图分类号：S718.43；S682.3.1 **文献标志码：**A **文章编号：**1673-923X(2026)08-0120-10

Physiological response of *Phalaenopsis* to drought stress and its drought tolerance evaluation

Si Baohua[1], Zhang Lijuan[1], Alimire·Wubuli[2], Lyu Minghao[1], Ma Wenshu[1], Liu Haijuan[1], Dong Fei[3]

（1. Institute of Horticulture, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750021, Ningxia, China;
2. College of Forestry and Grassland Science, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China;
3. Shandong Academy of Agricultural Sciences Institute of Leisure Agriculture, Jinan 250100, Shandong, China)

Abstract:【Objective】Exploring the physiological response to drought, to screen drought-resistant varieties, accelerate the breeding of drought-resistant *Phalaenopsis* varieties, meet the market demand in arid areas, and improve economic benefits.【Method】Eleven *Phalaenopsis* cultivars were selected, and their photosynthetic parameters, chlorophyll fluorescence characteristics and physiological indexes were investigated after natural drought following watering, and the drought-resistant varieties were screened out by using membership functions and cluster analysis.【Result】As the water content decreases, the net photosynthetic rate, chlorophyll fluorescence parameters, and chlorophyll content of most varieties continuously decline, while the intercellular CO_2 concentration, electrical conductivity, soluble sugar content, and malondialdehyde content continuously increase. The contents of CAT, SOD, and soluble proteins show a trend of first increasing and then decreasing. The drought tolerance evaluation system constructed based on the membership function method indicates that the drought tolerance ranking of the varieties is as follows: ‘Gold Princess’ ＞ ‘Dior’ ＞ ‘Sunrise’ ＞ ‘Aurea Mocha’ ＞ ‘Las Vegas’ ＞ ‘Anna’ ＞ ‘Prince Berry’ ＞ ‘Bordeaux’ ＞ ‘Gongxi Facai’ ＞ ‘Man Tianhong’ ＞ ‘Dream Lady’ . Through cluster analysis, the 11 *Phalaenopsis* varieties are divided into two categories based on their drought tolerance. The first

收稿日期（Received）：2025-07-17 **修订日期**（Revised）：2025-09-22

基金项目：宁夏回族自治区农业科技自主创新专项科技创新引导项目（NKYG-25-23）；宁夏科技领军人才培养项目（2023GKLRLX09）；东西部科技协作专项（津甘合作、鲁甘合作）（25CXNN010）。

第一作者：司宝华（729693738@qq.com），硕士研究生，助理研究员。

通信作者：张丽娟（juanzi800219@163.com），硕士，副研究员。

引文格式：司宝华 , 张丽娟 , 阿丽米热 • 吾布力 , 等 . 蝴蝶兰对干旱胁迫的生理响应及其耐旱性评价 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026, 46(8):120-129.

Si B H, Zhang L J, Alimire·Wubuli, et al. Physiological response of *Phalaenopsis* to drought stress and its drought tolerance evaluation[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(8):120-129.

* 本文为第二十八届中国科协年会学术论文成果。

Academic Papers of the 28th Annual Meeting of the China Association for Science and Technology.

category consists of six drought-tolerant varieties, namely ‘Gold Princess’ ‘Dior’ ‘Sunrise’ ‘Aurea Mocha’ ‘Las Vegas’ and ‘Anna’, the second category includes five general varieties, namely ‘Prince Berry’ ‘Bordeaux’ ‘Gongxi Facai’ ‘Man Tianhong’ and ‘Dream Lady’. 【Conclusion】‘Gold Princess’ ‘Dior’ ‘Sunrise’ ‘Aurea Mocha’ ‘Las Vegas’ and ‘Anna’ can adapt to the dry climate of Ningxia and are suitable for planting and popularizing in Ningxia; ‘Prince Berry’ ‘Bordeaux’ ‘Gongxi Facai’ ‘Man Tianhong’ and ‘Dream Lady’ may need frequent watering in the arid area of Ningxia and the cost is high, so they should be planted appropriately.
Keywords: *Phalaenopsis*; drought stress; physiology; membership function; drought tolerance evaluation

蝴蝶兰 *Phalaenopsis* spp. 作为兰科蝴蝶兰属多年附生草本植物，原产于热带亚热带地区，在长期的进化过程中，形成了喜温暖、高湿、通风良好且散射光充足的生态环境 [1]。作为全球兰科植物中经济价值最高的观赏花卉，蝴蝶兰 2023 年全球盆花市场销售额逆势增长。中国花卉协会发布的《2024 全国花卉产销形势分析报告》显示，在国内花卉市场整体承压的背景下，蝴蝶兰的消费量仍保持稳定增长。然而，全球气候变暖引发的干旱胁迫正给该产业带来严峻挑战。据国际兰花协会（IOA）2023 年统计数据，兰花主产区受干旱影响，年产量波动幅度达 20% ～ 35%，且这一波动趋势正持续加剧。

宁夏昼夜温差大，年日照时数超过 3 000 h，且气候凉爽，多年平均气温 9.5 ℃，为蝴蝶兰生长提供了优越的光温条件。但年平均降水量不足 200 mm，相对空气湿度较低，这种干燥的空气环境与蝴蝶兰原产地的高湿小气候形成鲜明对比 [2]。为满足其生长发育需求，需建设精准的环境调控温室及高效灌溉系统，这不仅增加了蝴蝶兰的生产成本，削弱了其市场竞争力，也限制了宁夏地区蝴蝶兰产业向规模化、产业化方向发展。此外，干旱胁迫还会对蝴蝶兰的生理生化过程产生一系列不利影响，导致其生长发育受阻、生物量积累减少、株高生长受限以及早衰现象加剧等问题，严重影响蝴蝶兰的观赏品质和经济价值 [3]。因此，在宁夏地区开展耐旱性蝴蝶兰品种的筛选与培育研究具有重要的理论意义和实践价值。

相关研究表明，植物的耐旱性受多方面复杂因素影响，传统常用的单一指标无法准确反映相关信息 [4]。目前，多品种植物光合生理协同响应的动态解析已在泡桐 [5]、葡萄 [6]、三角梅 [7] 和绒毛白蜡 [8] 等植物中得到应用，但关于蝴蝶兰的抗性研究较少，且现有研究多集中于单一生理指标的静态分析。汤肖玮等 [9] 对 8 个品种蝴蝶兰进行耐旱性筛选时，主要围绕叶片表型及水分含量指标展开分析，最终筛选出耐旱品种‘光芒四射’。李杰等 [10] 通过测定生理指标，并运用主成分分析法，对 4 个不同株系蝴蝶兰的抗冷性进行了分析与评估。谢振兴等 [11] 则采用主成分分析方法，对 22 个蝴蝶兰的抗寒性进行研究，最终筛选出 3 个抗寒品种。

目前市场上蝴蝶兰种植基质以水苔为主，水苔的保水性较强，若含水量过高，容易导致积水，引发蝴蝶兰肉质根腐烂。试验前期使用土壤温度水分测定仪观测发现：当基质含水量约为 60% 时，植株叶片挺拔，叶色翠绿有光泽，根系生长正常，新叶萌发也较为顺利；当含水量约为 20% 时，新叶颜色暗淡，底部老叶变黄、萎蔫，叶片向下耷拉，但及时补水能够恢复正常。本研究选取 11 个蝴蝶兰品种，浇水后做自然干旱处理，待基质含水量分别达到 60%、40%、20% 时，测定其光合参数和叶绿素荧光参数，结合生理指标分析，并运用隶属函数法综合量化植株耐旱性，为后期培育耐旱性强的蝴蝶兰品种提供理论支撑。

1　材料与方法

1.1　试验材料

试验材料来源于山东省农业科学院休闲农业研究所。选取大小一致、无病虫害且生长状况良好的 11 个蝴蝶兰品种（表 1），每个品种各 112 株。试验设置 4 个架子（前后左右各 1 个）作为 4 次重复，每个架子上每个品种 28 盆。

表 1　供试蝴蝶兰品种
Table 1　*Phalaenopsis* varieties used in the experiment

编号 No.	品种名 Variety	编号 No.	品种名 Variety
DA	‘迪奥’	AN	‘安娜’
HJ	‘红酒’	RS	‘日升’
BRWZ	‘贝瑞王子’	JYKF	‘金叶咖啡’
JGZ	‘金公主’	GXFC	‘恭喜发财’
MTH	‘满天红’	MHNL	‘梦幻女郎’
LSWJS	‘拉斯维加斯’		

1.2　试验地概况

试验在宁夏农林科学院现代农业综合试验基

地 25 号日光温室进行，白天平均气温为 23 ℃，夜间平均气温为 17 ℃，平均湿度为 68.35%。基质为国产水苔，速效磷含量 28 mg/kg，速效钾含量 20 mg/kg，pH 值 6.7。

1.3 试验设计

2024 年 11 月 27 日统一浇水至水分饱和，然后停止浇水，做自然干旱处理。使用土壤温度水分测定仪每天早晚各测 1 次基质含水量，每次测定 10 个点，取平均值。试验设置 3 个含水量梯度，分别为 60%（正常含水量，T1）、40%（轻微干旱，T2）和 20%（重度干旱，T3），待基质达到相应含水量时测量数据并采样。选取植株自顶向下第 3 片完全成熟的叶片作为样本，迅速用冰袋保存，带回实验室用液氮冷冻，置于 −80 ℃冰箱中备用，各指标测定均进行 3 次重复。

1.4 指标测定与计算

1.4.1 生理生化指标测定

利用便携式光合仪和叶绿素荧光分析仪测定光合参数和叶绿素荧光参数；丙二醛含量通过分光光度法定量分析；可溶性蛋白含量利用考马斯亮蓝染色技术进行测定；可溶性糖含量使用蒽酮比色法测定；相对电导率采用浸泡法测定；叶绿素含量通过乙醇提取法进行有效提取并测定；过氧化氢酶、超氧化物歧化酶活性使用北京索莱宝科技有限公司试剂盒测定。

1.4.2 干旱损伤指数计算

根据干旱胁迫对蝴蝶兰叶片表型性状的影响程度，参考萱草 [12]、芍药 [13] 和菜豆 [14] 的相关研究方法，对蝴蝶兰叶片表型进行量化评估（表 2）。9:00—11:30 随机选取 10 盆植株进行评估，计算每个处理下每个品种的干旱损伤指数（DDI），DDI 值越高，说明蝴蝶兰叶片的表型性状受干旱胁迫的损伤越大。干旱损伤指数计算公式如下：

$$D=\frac{\sum_{k=1}^{10}S_k}{10}。\quad（1）$$

式中：D 为干旱损伤指数；S_k 为第 k 株植株的干旱损伤得分。

1.4.3 隶属函数值计算

参考肖文芳等 [15] 的隶属函数法，当某项指标与蝴蝶兰的耐旱性正相关时，计算公式为：

$$U(X_i)=(X_i-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min})。\quad（2）$$

式中：$U(X_i)$ 为隶属函数值，X_i 为某项指标测定值，$X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 为某项指标的最大值和最小值。

当某项指标与蝴蝶兰的耐旱性负相关时，则通过反隶属函数计算，公式为：

$$U(X_i)=1-(X_i-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min})。\quad（3）$$

表 2 蝴蝶兰叶片表型性状评价

Table 2 *Phalaenopsis* leaf phenotypic traits evaluation

等级 Grade	赋值 Assignment	叶片性状 Leaf traits
0 级 Grade 0	0	叶片生长正常，没有明显干旱症状
1 级 Grade 1	1	底部老叶局部发黄，尚未萎蔫
2 级 Grade 2	2	新叶颜色暗淡，底部老叶变黄，严重萎蔫

1.5 数据处理

运用 SPSS 24.0 软件进行数据分析，采用 Origin 2022 软件作图。通过聚类分析和隶属函数法对不同品种蝴蝶兰的耐旱性进行综合评价。

2 结果与分析

2.1 不同含水量对蝴蝶兰叶片干旱损伤指数的影响

随着含水量的降低，各品种的干旱损伤指数逐渐增大，品种间的差异也逐渐显著。当含水量为 60%、40% 和 20% 时，叶片平均干旱损伤指数分别为 0、0.592、0.842，其中‘梦幻女郎’底部老叶较多变黄、严重萎蔫。当含水量为 40%（T2）时，‘梦幻女郎’干旱损伤指数达 0.900，与‘金公主’差异显著，与其他品种差异不显著，‘金公主’的干旱损伤指数最低，仅为 0.200。当含水量为 20%（T1）时，‘梦幻女郎’的干旱损伤指数达 1.500，与‘迪奥’‘金公主’‘贝瑞王子’‘日升’和‘金叶咖啡’差异显著，与‘安娜’‘红酒’‘恭喜发财’‘拉斯维加斯’和‘满天红’差异不显著，其中‘迪奥’和‘金公主’的干旱损伤指数较低（表 3）。

2.2 不同含水量对蝴蝶兰叶片光合生理的影响

从表 4 可以看出，随着含水量降低，大多数品种的净光合速率呈下降趋势，但品种间的响应存在差异，且在含水量为 20% 时，品种间的差异缩小。其中，‘恭喜发财’的净光合速率在含水量为 40% 时升高，含水量为 20% 时降低，但较其他品种仍处于较高水平。各品种胞间 CO_2 浓度随含水量下降总体呈上升趋势，其中‘贝瑞王子’的增幅最大，T3 条件下胞间 CO_2 浓度为 T1 的 3.05 倍；其次是‘金叶咖啡’，T3 条件下胞间 CO_2 浓度为

表 3　不同含水量对蝴蝶兰叶片的影响 †

Table 3　Effects of different water contents on leaves of *Phalaenopsis*

品种名 Variety	干旱损伤指数 Drought damage index		
	T1	T2	T3
‘拉斯维加斯’LSWJS	0±0 a	0.500±0.107 ab	0.900±0.238 ab
‘恭喜发财’GXFC	0±0 a	0.600±0.316 ab	1.000±0.471 ab
‘贝瑞王子’BRWZ	0±0 a	0.800±0.422 ab	0.900±0.483 b
‘安娜’AN	0±0 a	0.700±0.483 ab	0.900±0.376 ab
‘红酒’HJ	0±0 a	0.800±0.232 ab	0.900±0.238 ab
‘日升’RS	0±0 a	0.600±0.116 ab	0.700±0.483 b
‘金叶咖啡’JYKF	0±0 a	0.500±0.207 ab	0.700±0.675 b
‘满天红’MTH	0±0 a	0.600±0.466 ab	1.000±0.316 ab
‘梦幻女郎’MHNL	0±0 a	0.900±0.376 a	1.500±0.527 a
‘金公主’JGZ	0±0 a	0.200±0.422 b	0.600±0.516 b
‘迪奥’DA	0±0 a	0.400±0.216 ab	0.600±0.617 b
平均值 Average value	0	0.592±0.050	0.842±0.045

† 不同小写字母表示差异显著（$P < 0.05$）。下同。Different lowercase letters indicate significant difference($P < 0.05$). The same below.

表 4　不同含水量对蝴蝶兰叶片光合生理的影响

Table 4　Effects of different water contents on photosynthetic physiology of *Phalaenopsis* leaves

含水量 Water content	品种 Variety	净光合速率 Net photosynthetic rate /(mol·m^{-2}·s^{-1})	胞间 CO_2 浓度 Intercellular CO_2 concentration /(μmol·mol^{-1})	最大光化学量子产量 F_v/F_m	PS Ⅱ潜在光化学效率 F_v/F_o	总光合性能指数 Total performance index
T1	LSWJS	2.24±0.26 a	227.33±16.25 bc	0.790±0.001 f	3.69±0.07 c	1.97±0.29 bc
	GXFC	1.19±0.04 bc	269.00±11.30 abc	0.810±0.002 cde	4.38±0.06 ab	2.10±0.39 bc
	BRWZ	0.49±0.06 d	135.67±2.60 d	0.810±0.006 de	4.58±0.11 ab	2.60±0.36 ab
	AN	0.52±0.01 d	296.00±12.40 ab	0.820±0.003 cd	4.34±0.09 b	1.57±0.09 c
	HJ	1.31±0.16 bc	235.67±18.34 bc	0.810±0.003 cde	4.51±0.16 ab	1.48±0.14 c
	RS	1.03±0.63 cd	263.33±16.72 abc	0.820±0.004 bcd	4.66±0.16 ab	2.03±0.16 bc
	JYKF	1.71±0.57 ab	260.33±10.08 abc	0.820±0.002 abc	4.59±0.07 ab	1.57±0.16 c
	MTH	0.48±0.12 d	325.33±15.69 a	0.820±0.002 abc	4.57±0.07 ab	1.86±0.24 bc
	MHNL	1.56±0.10 bc	258.33±18.59 abc	0.830±0.003 ab	4.44±0.32 ab	2.73±0.43 ab
	JGZ	1.39±0.34 bc	206.33±5.73 cd	0.830±0.004 a	4.82±0.11 a	3.25±0.48 a
	DA	1.66±0.35 b	196.67±13.89 cd	0.800±0.006 e	4.26±0.08 b	1.95±0.22 bc
T2	LSWJS	1.33±0.68 b	313.33±18.01 ab	0.750±0.045 c	3.28±0.50 b	1.39±0.04 bcd
	GXFC	2.20±0.66 a	394.67±10.67 a	0.790±0.023 abc	4.07±0.18 a	1.72±0.16 bcd
	BRWZ	0.30±0.18 cd	215.33±18.35 b	0.760±0.019 bc	4.41±0.13 a	2.16±0.14 ab
	AN	0.38±0.11 cd	408.67±23.43 a	0.810±0.003 ab	4.11±0.09 a	1.35±0.12 bcd
	HJ	0.90±0.13 bcd	366.00±24.93 ab	0.800±0.004 abc	3.92±0.13 ab	1.18±0.15 cd
	RS	0.65±0.12 bcd	331.67±8.95 ab	0.790±0.015 abc	4.48±0.13 a	1.84±0.32 bc
	JYKF	1.05±0.11 bc	392.33±5.70 a	0.810±0.004 ab	4.22±0.12 a	0.96±0.07 d
	MTH	0.24±0.06 d	371.67±18.34 ab	0.810±0.003 ab	4.25±0.09 a	1.57±0.37 bcd
	MHNL	0.90±0.74 bcd	320.00±11.06 ab	0.810±0.001 ab	3.96±0.40 ab	2.13±0.19 ab
	JGZ	0.59±0.12 bcd	305.67±12.11 ab	0.830±0.003 a	4.29±0.08 a	2.83±0.57 a
	DA	0.93±0.37 bcd	266.33±13.90 ab	0.800±0.004 ab	3.77±0.21 ab	1.62±0.19 bcd
T3	LSWJS	0.14±0.06 bc	429.00±15.41 ab	0.720±0.035 bc	2.09±0.09 d	0.91±0.42 ab
	GXFC	0.63±0.10 abc	455.00±15.58 ab	0.760±0.018 abc	3.20±0.31 bc	1.26±0.08 ab
	BRWZ	0.25±0.13 abc	414.00±16.96 ab	0.710±0.006 c	3.62±0.17 b	1.48±0.23 a
	AN	0.20±0.01 abc	561.00±23.52 a	0.780±0.019 ab	3.63±0.32 b	1.27±0.02 ab
	HJ	0.18±0.06 abc	466.00±19.92 ab	0.780±0.016 ab	3.95±0.07 ab	1.04±0.02 ab
	RS	0.47±0.20 abc	405.00±14.60 ab	0.750±0.018 abc	3.52±0.16 bc	1.20±0.15 ab
	JYKF	0.68±0.78 a	560.33±11.09 a	0.780±0.018 ab	4.02±0.30 ab	0.86±0.04 ab
	MTH	0.21±0.06 abc	570.67±1.86 a	0.740±0.029 abc	3.62±0.27 b	0.69±0.04 b
	MHNL	0.21±0.08 abc	494.00±8.68 ab	0.750±0.026 abc	2.78±0.33 cd	1.38±0.21 a
	JGZ	0.13±0.01 c	322.67±16.48 b	0.810±0.003 a	4.56±0.20 a	1.36±0.23 a
	DA	0.65±0.23 ab	323.33±5.58 b	0.770±0.017 abc	3.56±0.36 bc	0.94±0.17 ab

T1 的 2.15 倍；‘金公主’的增幅最小，T3 条件下胞间 CO_2 浓度仅为 T1 的 1.56 倍。叶绿体 PS Ⅱ最大光化学量子产量（F_v/F_m）可反映 PS Ⅱ反应中心的光能转换效率。随着干旱程度加剧，各品种的 F_v/F_m 值逐渐降低。F_v/F_o 反映 PS Ⅱ光反应中心的潜在活性[16]。随着干旱程度加剧，多数品种的 F_v/F_o 值呈逐渐降低趋势，其中‘红酒’和‘金公主’则呈先降后升的变化。随着干旱程度加剧，各品种总光合性能指数总体呈下降趋势。

2.3 不同含水量对蝴蝶兰叶片叶绿素含量的影响

随着含水量下降，各品种的叶绿素含量呈持续下降趋势。当含水量从 60% 降至 20% 时，‘贝瑞王子’的总叶绿素含量降幅最大，为 88.89%；其次是‘日升’，降幅为 88.82%；‘金叶咖啡’的降幅最小，为 78.76%。叶绿素 a/b 在多数品种中持续下降，但在‘红酒’中呈现先降后升的趋势。T3 与 T1 条件相比较，‘恭喜发财’的叶绿素 a/b 降幅最大，为 78.48%；其次是‘梦幻女郎’和‘贝瑞王子’；‘迪奥’的降幅最小（表 5）。

2.4 不同含水量对蝴蝶兰叶片生理指标的影响

随着含水量下降，大部分品种的 CAT、SOD 活性和可溶性蛋白含量呈现先上升后下降的趋势，但‘日升’的 CAT 活性持续上升，且 T3 条件下比 T1 上升 2.55 倍。‘梦幻女郎’和‘金公主’的可溶性蛋白含量持续下降。随着含水量下降，大部分品种电导率、可溶性糖含量和丙二醛含量持续上升。‘恭喜发财’‘金叶咖啡’‘满天红’的可溶性糖含量呈现先上升后下降的趋势，‘红酒’呈现先下降后上升的趋势。‘梦幻女郎’的电导率提升幅度最大，其次为‘恭喜发财’和‘金叶咖啡’，‘迪奥’增幅最小。‘梦幻女郎’的丙二醛含量先下降后上升，且增幅最大；其次是‘安娜’和‘拉斯维加斯’（图 1）。

2.5 蝴蝶兰耐旱指标相关性分析

为了明确各指标之间的关联程度，对 15 个指标进行相关性分析（图 2）。结果表明，净光合速率与叶绿素含量呈显著正相关，与丙二醛含量、PS Ⅱ光吸收截面呈极显著负相关，与胞间 CO_2 浓度呈显著负相关；胞间 CO_2 浓度、PS Ⅱ光吸收截面、丙二醛含量两两之间呈极显著正相关，且胞间 CO_2 浓度、PS Ⅱ光吸收截面与总光合性能指数和叶绿素含量均呈极显著负相关；总光合性能指数、最大光化学量子产量、PS Ⅱ潜在光化学效率与叶绿素含量呈显著或极显著正相关，与丙二醛含量呈显著或极显著负相关；超氧化物歧化酶活性与可溶性蛋白含量呈极显著正相关，过氧化氢酶活性与其他指标之间没有显著关联。

2.6 隶属函数分析

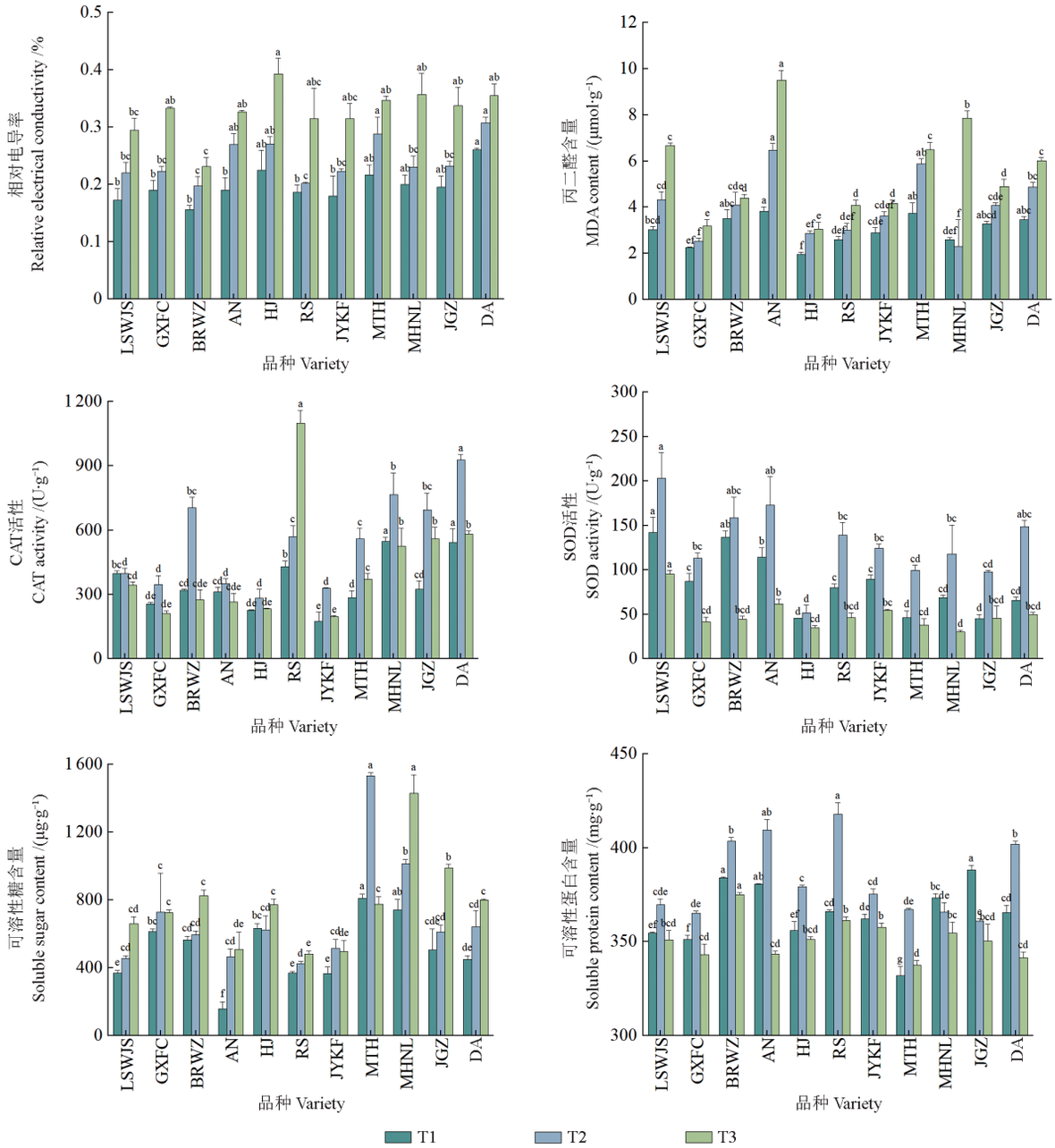
本研究选取含水量为 20% 时的测定数据，进行蝴蝶兰耐旱性隶属函数分析（表 6）。通过隶属函数公式计算每个品种各指标的隶属函数值，求平均值得到各品种的综合隶属函数值，并按照隶属函数值的大小进行综合排序。各品种耐旱性表现为‘金公主’＞‘迪奥’＞‘日升’＞‘金叶咖啡’＞‘拉斯维加斯’＞‘安娜’＞‘贝瑞王子’＞‘红酒’＞‘恭喜发财’＞‘满天红’＞‘梦幻女郎’。

以蝴蝶兰 11 个品种各指标的隶属函数值为依据，进行聚类分析（图 3）。当欧氏距离为 1.7 时，

表 5 不同含水量下各品种蝴蝶兰叶片叶绿素含量

Table 5 Chlorophyll content of different *Phalaenopsis* varieties under different water contents

品种 Variety	叶绿素 a 含量 Chlorophyll a content /(mg·g^{-1})			总叶绿素含量 Total chlorophyll content /(mg·g^{-1})			叶绿素 a/b Chlorophyll a/b		
	T1	T2	T3	T1	T2	T3	T1	T2	T3
LSWJS	32.82±0.69 bcd	3.58±0.06 cd	2.81±0.10 c	50.07±1.01 bcd	9.01±0.23 ab	7.47±0.19 abc	1.90±0.03 f	0.66±0.02 bc	0.60±0.02 bc
GXFC	25.41±1.02 ef	2.37±0.19 f	1.72±0.13 e	36.83±2.07 ef	6.55±0.84 bcd	5.32±0.35 cd	2.23±0.03 de	0.58±0.05 c	0.48±0.05 d
BRWZ	32.28±1.04 abc	2.28±0.22 cde	1.86±0.21 d	46.25±1.61 cde	5.52±0.34 d	5.14±0.77 d	2.32±0.04 bcd	0.70±0.05 abc	0.58±0.03 c
AN	31.34±0.69 a	3.47±0.55 a	2.71±0.32 a	45.56±0.92 cde	8.55±1.28 bc	7.07±0.73 abcd	2.20±0.01 ef	0.68±0.03 bc	0.62±0.02 bc
HJ	26.40±1.20 f	2.74±0.18 ef	2.29±0.32 e	38.39±1.84 def	7.12±0.60 bcd	5.82±0.74 bcd	2.20±0.02 ef	0.63±0.03 bc	0.65±0.01 abc
RS	39.85±1.20 def	3.70±0.50 def	2.53±0.39 d	56.82±2.11 abc	8.79±1.12 ab	6.35±0.90 abcd	2.35±0.01 bc	0.73±0.06 abc	0.66±0.02 abc
JYKF	21.93±0.25 cde	2.81±0.39 cdef	2.59±0.29 d	31.54±0.24 f	7.05±0.89 bcd	6.70±0.91 abcd	2.28±0.04cde	0.66±0.03 bc	0.64±0.02 abc
MTH	27.71±0.24 ab	3.70±0.39 ab	2.79±0.12 c	39.04±0.40 def	8.55±0.73 bc	6.93±0.35abcd	2.45±0.04 a	0.76±0.05 ab	0.68±0.02 ab
MHNL	22.99±1.11 def	2.18±0.43 f	2.03±0.29 b	32.60±1.07 f	5.79±0.53 cd	5.51±0.73 cd	2.40±0.04 ab	0.64±0.06 bc	0.58±0.04 bc
JGZ	41.67±0.88 abcd	3.77±0.38 cde	3.22±0.10 d	60.09±1.21 ab	9.34±0.97 ab	8.16±0.39 a	2.26±0.02 cde	0.68±0.01 bc	0.65±0.02 abc
DA	42.78±0.59 abc	5.23±0.15 bc	3.31±0.31 c	63.02±0.95 a	11.54±0.34 a	7.93±0.72 ab	2.12±0.05 e	0.84±0.07 a	0.72±0.04 a



不同小写字母表示差异显著（$P < 0.05$）。Different lowercase letters indicate significant difference($P < 0.05$).

图 1　不同含水量对蝴蝶兰叶片生理指标的影响

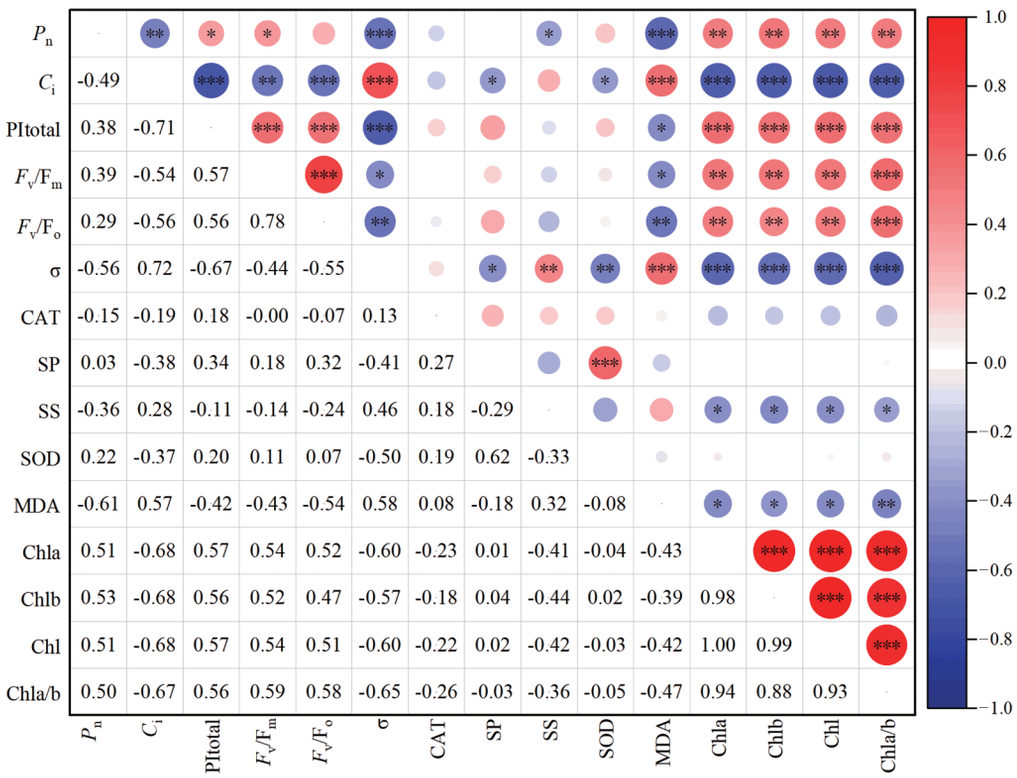
Fig. 1　Effects of different water contents on physiological indicators of *Phalaenopsis* leaves

11 个蝴蝶兰品种按照耐旱性强弱分为 2 类：第 1 类为耐旱品种，包含‘金公主’‘迪奥’‘日升’‘金叶咖啡’‘拉斯维加斯’和‘安娜’6 个品种；第 2 类为一般品种，包含‘贝瑞王子’‘红酒’‘恭喜发财’‘满天红’和‘梦幻女郎’5 个品种。值得注意的是，耐旱品种中的‘金公主’和‘迪奥’单独聚为一类，属于高耐旱品种。

3　讨　论

3.1　干旱胁迫下蝴蝶兰表型变化

干旱是制约植物生长发育的环境因素之一。当蝴蝶兰遭受干旱胁迫时，生物量积累减少，叶片发育受到抑制，植株通过气孔快速关闭维持水分平衡，净光合速率和胞间 CO_2 浓度降低，储藏物质消耗，新的光合产物难以形成，从而启动渗透调节物质合成与抗氧化酶系统防御机制[3,17-18]。与此同时，叶片变薄，失去光泽，逐渐萎蔫，可能影响花朵的正常开放和发育，根系受损，甚至出现早衰腐烂现象。评估干旱对植物的影响程度，需要选择合适的指标。植物叶片干旱损伤指数可作为量化指标，直接表征其应对干旱胁迫的敏感特性，叶片干旱损伤指数越高，表明植株越不耐旱。在含水量为 20% 时，‘梦幻女郎’的叶片干旱损



*，$P \leqslant 0.05$；**，$P \leqslant 0.01$；***，$P \leqslant 0.001$。P_n：净光合速率；C_i：胞间 CO_2 浓度；PItotal：总光合性能指数；F_v/F_m：最大光化学量子产量；F_v/F_o：PS Ⅱ潜在光化学效率；σ：PS Ⅱ光吸收截面；CAT：过氧化氢酶活性；SP：可溶性蛋白含量；SS：可溶性糖含量；SOD：超氧化物歧化酶活性；MDA：丙二醛含量；Chla：叶绿素 a 含量；Chlb：叶绿素 b 含量；Chl：总叶绿素含量；Chla/b：叶绿素 a/b。

*, $P \leqslant 0.05$; **, $P \leqslant 0.01$; ***, $P \leqslant 0.001$. P_n: Photosynthetic rate; C_i: Intercellular CO_2 concentration; PI total: Total performance index of photosynthesis; F_v/F_m: Maximum photochemical quantum yield; F_v/F_o: Potential photochemical efficiency of PS Ⅱ ; σ: PS Ⅱ light absorption cross-section; CAT: Catalase activity; SP: Soluble protein content; SS: Soluble sugar content; SOD: Superoxide dismutase activity; MDA: Malondialdehyde content; Chla: Chlorophyll a content; Chlb: Chlorophyll b content; Chl: Total chlorophyll content; Chla/b: Chlorophyll a/b.

图 2　不同指标相关性分析

Fig. 2　Correlation analysis of different indicators

表 6　11 种蝴蝶兰隶属函数值及综合排序

Table 6　Membership function values and comprehensive ranking of 11 *Phalaenopsis* species

品种 Variety	净光合速率 P_n	胞间 CO_2 浓度 C_i	总光合性能指数 Total PI	最大光化学量子产量 F_v/F_m	PS Ⅱ潜在光化学效率 F_v/F_o	PS Ⅱ光吸收截面 σ	过氧化氢酶活性 CAT	可溶性蛋白含量 SP	可溶性糖含量 SS	超氧化物歧化酶活性 SOD	丙二醛含量 MDA	叶绿素 a 含量 Chla	叶绿素 b 含量 Chlb	总叶绿素含量 Chl	叶绿素 a/b Chla/b	隶属函数值 Membership function values	排序 Rank
JGZ	0	1.000	0.841	1.000	1.000	0.343	0.402	0.350	0.465	0.234	0.715	0.943	1.000	1.000	0.720	0.667	1
DA	0.952	0.997	0.317	0.610	0.593	0.235	0.427	0.105	0.665	0.298	0.541	1.000	0.803	0.922	1.000	0.631	2
RS	0.626	0.668	0.640	0.419	0.578	0.484	1.000	0.641	1.000	0.244	0.841	0.506	0.322	0.399	0.739	0.607	3
JYKF	1.000	0.042	0.214	0.670	0.779	0.483	0	0.539	0.986	0.369	0.826	0.546	0.499	0.517	0.645	0.541	4
LSWJS	0.030	0.571	0.281	0.149	0	0.609	0.162	0.363	0.810	1.000	0.437	0.684	0.829	0.770	0.506	0.48	5
AN	0.132	0.039	0.738	0.676	0.622	0.409	0.075	0.160	0.971	0.481	0	0.622	0.650	0.640	0.569	0.452	6
BRWZ	0.223	0.632	1.000	0	0.619	1.000	0.088	1.000	0.639	0.216	0.794	0.083	0	0	0.386	0.445	7
HJ	0.090	0.422	0.441	0.701	0.750	0	0.041	0.372	0.694	0.071	1.000	0.356	0.146	0.224	0.681	0.399	8
GXFC	0.916	0.466	0.724	0.476	0.448	0.371	0.017	0.155	0.742	0.171	0.982	0	0.190	0.060	0	0.381	9
MTH	0.151	0	0	0.368	0.620	0.287	0.192	0	0.689	0.121	0.466	0.672	0.517	0.593	0.806	0.365	10
MHNL	0.157	0.309	0.866	0.457	0.279	0.223	0.365	0.457	0	0	0.254	0.194	0.117	0.122	0.422	0.281	11

伤指数最高，底部老叶变黄、严重萎蔫，最不耐旱；而‘金公主’和‘迪奥’的叶片干旱损伤指数最低，最为耐旱。

3.2　蝴蝶兰对干旱胁迫的生理响应分析

光合作用、叶绿素荧光参数与叶绿素构成一个动态平衡系统：叶绿素通过吸收与传递光能驱动光反应，荧光参数实时监测光系统状态，而光合效率反馈调节色素代谢与能量分配，三者共同构成植物光能利用与胁迫响应的核心调控网络[19]。植物含水量下降，引发叶绿体膜脂过氧化，导致总叶绿素含量下降，细胞内光能捕获与转化利用

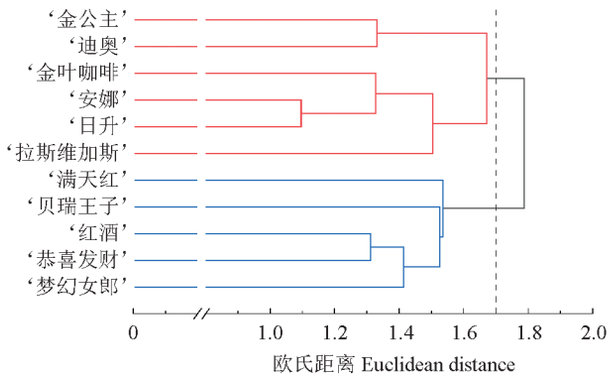


图 3　11 种蝴蝶兰耐旱性聚类分析
Fig. 3　Cluster analysis of drought tolerance of 11 *Phalaenopsis* species

的动态平衡被破坏，导致光合作用效能降低 [20]。这与本研究结论一致：随着含水量的下降，不同品种蝴蝶兰的净光合速率、F_v/F_m、F_v/F_o 和叶绿素含量均出现不同程度下降，而胞间 CO_2 浓度随含水量的下降呈上升趋势。

相对电导率与丙二醛含量作为衡量细胞膜透性的直接参数，在干旱胁迫下呈持续上升趋势，电解质渗漏加剧，膜系统受损严重，进而引发氧化损伤。这与汪月霞等 [21] 和孙文秀等 [22] 的研究结果相似。渗透物质的积累是植物抵御干旱最常见的反应之一，干旱胁迫促使植物体内积累大量渗透调节物质来维持细胞渗透压 [23]。可溶性糖和可溶性蛋白在植物的渗透调节中发挥重要作用。不同植物对干旱的耐受性不同，耐旱品种可能在胁迫初期积累更多可溶性糖和可溶性蛋白，但重度胁迫下可溶性糖和可溶性蛋白仍可能因代谢失衡而下降 [24]。本研究中，大部分品种的可溶性蛋白含量呈现先上升后下降的趋势，这和牛欣益等 [25] 的研究结果相似。但‘梦幻女郎’和‘金公主’可溶性蛋白含量呈现持续下降的趋势，这与朱维琴等 [26] 的研究结果相似。这可能是合成途径受阻 [27]、分解代谢增强导致物质消耗大于合成 [28]，也可能是细胞结构破坏与基因表达调控所致 [29]。

为抵御胁迫，植物通常会形成一些能清除 ROS 的抗氧化酶，如 SOD、POD 和 CAT 等。植物通过调节抗氧化酶的基因表达来增加酶的合成，从而提高其活性，有助于清除 ROS，减少干旱胁迫引发的氧化反应 [30]。本研究中，大部分品种的 CAT、SOD 活性呈现先升高后下降的趋势，而‘日升’的 CAT 活性持续上升。这可能是因为‘日升’品种具有更强的渗透调节能力，通过积累脯氨酸、可溶性糖等物质维持细胞膨压，减少干旱导致的细胞损伤，从而为 CAT 提供稳定的微环境。

3.3　蝴蝶兰耐旱品种综合评价

植物的耐旱性受多种因素共同影响，单一指标并不能直接评价植物的耐旱性。本研究受样本量限制，最终运用隶属函数法对 11 个蝴蝶兰品种的耐旱性进行评估。结果表明，各品种耐旱性表现为‘金公主’＞‘迪奥’＞‘日升’＞‘金叶咖啡’＞‘拉斯维加斯’＞‘安娜’＞‘贝瑞王子’＞‘红酒’＞‘恭喜发财’＞‘满天红’＞‘梦幻女郎’。通过聚类分析，将 11 个蝴蝶兰品种分为 2 类：第 1 类为耐旱品种，包括‘金公主’‘迪奥’‘日升’‘金叶咖啡’‘拉斯维加斯’和‘安娜’6 个品种，能适应宁夏的干旱气候，适合在宁夏种植推广；第 2 类为一般品种，包含‘贝瑞王子’‘红酒’‘恭喜发财’‘满天红’和‘梦幻女郎’5 个品种，在宁夏干旱区可能要频繁浇水，成本较高。值得注意的是，耐旱品种中‘金公主’和‘迪奥’单独聚为一类，成为高耐旱品种。通过筛选耐旱性强的蝴蝶兰品种，不仅可以降低生产过程中的水资源消耗和栽培设施投入，减少生产成本，还能丰富宁夏地区花卉品种资源，促进花卉产业结构优化升级和可持续发展，满足市场对高品质蝴蝶兰的多样化需求。

4　结　论

本研究分析了 11 个蝴蝶兰品种在自然干旱下的光合参数、叶绿素荧光特性及生理指标变化规律，并运用隶属函数法和聚类分析筛选出 6 个耐旱品种，分别是‘金公主’‘迪奥’‘日升’‘金叶咖啡’‘拉斯维加斯’和‘安娜’，适合在宁夏干旱区域推广种植。

参考文献：

[1]　陈之光 . 濒危蝴蝶兰属植物繁育系统和超低温保存研究 [D]. 郑州 : 河南农业大学 ,2023:1.
Chen Z G. Breeding system and cryopreservation of endangered *Phalaenopsis* plants[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University,2023:1.

[2]　张智翔 . 宁夏银北明灌暗排区土壤水盐运移及模型模拟研究 [D]. 银川 : 宁夏大学 ,2025:9.
Zhang Z X. Study on soil water-salt transport and model simulation in the open irrigation and subsurface drainage area of Yinbei, Ningxia[D]. Yinchuan: Ningxia University,2025:9.

[3]　艾鑫 , 王诗语 , 马鑫磊 , 等 . 不同油酸含量花生品种全生育期耐旱性鉴定指标筛选和综合评价 [J]. 沈阳农业大学学报 , 2024,55(5):513-522.

Ai X, Wang S Y, Ma X L, et al. Selection and comprehensive evaluation of drought tolerance identification indexes during the whole growth period for peanut varieties with different oleic acid contents[J]. Journal of Shenyang Agricultural University,2024, 55(5):513-522.

[4] 凌瑞 , 戴中武 , 代晓雨 , 等 . 8 个绣球品种耐热性综合评价与耐热指标筛选 [J]. 热带作物学报 ,2021,42(8):2209-2218.
Ling R, Dai Z W, Dai X Y, et al. Evaluation of heat tolerance and screening the index for the assessment of heat tolerance in cultivars of *Hydrangea*[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021,42(8):2209-2218.

[5] 朱秀红 , 马静雨 , 张龙冲 , 等 . 白花泡桐幼苗对铅胁迫的耐受机制与积累特性 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2025,45(9):1-11.
Zhu X H, Ma J Y, Zhang L C, et al. The tolerance mechanism and accumulation characteristics of *Paulownia fortunei* seedlings under lead stress[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2025,45(9):1-11.

[6] 韩凯 , 刘畅 , 王浩楠 , 等 . 干旱和铜胁迫对早黑宝葡萄幼苗生理特性及 *ADH* 基因家族的影响 [J]. 果树学报 ,2025,42(9): 1958-1976.
Han K, Liu C, Wang H N, et al. Effects of drought and copper stress on the physiological characteristics and *ADH* gene family in Zaoheibao grape seedlings[J]. Journal of Fruit Science, 2025,42(9):1958-1976.

[7] 宋爽 , 蔡宇轩 , 梁宇翔 , 等 . NO_2 胁迫对三角梅幼苗生理特性的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2023,43(11):73-83.
Song S, Cai Y X, Liang Y X, et al. Effects of NO_2 stress on physiological characteristics of *Bougainvillea glabra* seedlings[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2023,43(11):73-83.

[8] 吉子彧 . 绒毛白蜡对夜间光照的光合响应和生理生化适应性 [D]. 北京 : 北京林业大学 ,2023:17-31.
Ji Z Y. Photosynthetic response and physiological and biochemical adaptability of *Fraxinus velutina* under nighttime light[D]. Beijing: Beijing Forestry University,2023:17-31.

[9] 汤肖玮 , 张敬奇 , 刘晨 , 等 . 8 个蝴蝶兰品种耐旱性评价 [J]. 安徽农业科学 ,2025,53(1):48-50,56.
Tang X W, Zhang J Q, Liu C, et al. Drought tolerance evaluation of eight *Phalaenopsis* cultivars[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2025,53(1):48-50,56.

[10] 李杰 , 匡萍 , 王芝娜 , 等 . 蝴蝶兰抗冷性株系的鉴定与筛选 [J]. 北京林业大学学报 ,2013,35(5):91-96.
Li J, Kuang P, Wang Z N, et al. Identifying and screening cold tolerance genetypes of *Phalaenopsis* varieties[J]. Journal of Beijing Forestry University,2013,35(5):91-96.

[11] 谢振兴 , 刘国敏 , 陆祖正 , 等 . 自然低温下 22 个蝴蝶兰品种的抗寒性评价 [J]. 北方园艺 ,2024(23):58-65.
Xie Z X, Liu G M, Lu Z Z, et al. Evaluation of cold resistance in 22 *Phalaenopsis* varieties under natural low temperature[J]. Northern Horticulture,2024(23):58-65.

[12] 贾民隆 , 张晓纲 , 梁峥 , 等 . 20 个不同品系萱草的耐旱性筛选与评价 [J]. 种子 ,2021,40(6):90-95.
Jia M L, Zhang X G, Liang Z, et al. Screening and evaluation of drought tolerance of 20 different *Hemerocallis lines*[J]. Seed,2021,40(6):90-95.

[13] 王琪 . 芍药响应干旱胁迫的转录组学分析及相关转录因子的功能研究 [D]. 北京 : 北京林业大学 ,2020:19.
Wang Q. Transcriptomics analysis of *Paeonia lactiflora* in response to drought stress and functional study of related transcription factors[D]. Beijing: Beijing Forestry University,2020:19.

[14] 蔡德宝 , 杨树琼 , 马郡妍 , 等 . 普通菜豆苗期耐旱性鉴定 [J]. 植物遗传资源学报 ,2025,26(7):1355-1369.
Cai D B, Yang S Q, Ma J Y, et al. Screening of drought tolerant germplasm of common bean at the seedling stage[J]. Journal of Plant Genetic Resources,2025,26(7):1355-1369.

[15] 肖文芳 , 李佐 , 陈和明 , 等 . 不同蝴蝶兰品种耐热性比较测定及综合评价 [J]. 热带农业科学 ,2018,38(12):43-48.
Xiao W F, Li Z, Chen H M, et al. Comparative measurement and evaluation of heat tolerance of different *Phalaenopsis* varieties[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture,2018,38(12):43-48.

[16] 胡肖肖 , 唐宇力 , 贾梅 , 等 . 干旱胁迫对 13 个杜鹃品种生理特性的影响 [J]. 江苏农业科学 ,2017,45(6):101-105.
Hu X X, Tang Y L, Jia M, et al. Effects of drought stress on physiological characteristics of 13 *Rhododendron* varieties[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2017,45(6):101-105.

[17] 郭豪 , 李光宁 , 刘涛 , 等 . 万寿菊幼苗形态及生理生化指标对干旱胁迫的响应 [J]. 中国农学通报 ,2025,41(1):69-75.
Guo H, Li G N, Liu T, et al. Responses of morphological characteristics and physiological and biochemical index of marigold seedlings to drought stress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2025,41(1):69-75.

[18] 苏艳娥 , 田晓明 , 向光锋 , 等 . 钩藤对干旱胁迫和复水处理的生理响应 [J]. 经济林研究 ,2026,44(1):219-229 .
Su Y E, Tian X M, Xiang G F, et al. Physiological responses of Uncaria rhynchophylla to drought stress and rewatering treatment[J]. Non-wood Forest Research,2026,44(1):219-229.

[19] 李娟霞 . 一年生早熟禾对干旱低温复合胁迫的生理响应 [D]. 兰州 : 甘肃农业大学 ,2025:60-62.
Li J X. Physiological response of annual bluegrass to combined drought and cold stress[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2025:60-62.

[20] 戴文静 , 丁彦芬 , 赵泖 , 等 . 干旱胁迫对 3 种紫堇属植物生理

及光合特性的影响 [J]. 西北农林科技大学学报 (自然科学版), 2025,53(12):164-174.

Dai W J, Ding Y F, Zhao Y, et al. Effects of drought stress on physiological and photosynthetic characteristics of three species of *Corydalis*[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition),2025,53(12):164-174.

[21] 汪月霞 , 孙国荣 , 王建波 , 等 .NaCl 胁迫下星星草幼苗 MDA 含量与膜透性及叶绿素荧光参数之间的关系 [J]. 生态学报 , 2006,26(1):122-129.

Wang Y X, Sun G R, Wang J B, et al. Relationships among MDA content, plasma membrane permeability and the chlorophyll fluorescence parameters of *Puccinellia tenuiflora* seedlings under NaCl stress[J]. Acta Ecologica Sinica,2006,26(1):122-129.

[22] 孙文秀 , 邵晨阳 , 陈妍妍 , 等 . 干旱胁迫下 2 种内生真菌对烟草生理生化指标及 *NAC* 基因表达的影响 [J]. 华北农学报 , 2024,39(1):113-119.

Sun W X, Shao C Y, Chen Y Y, et al. Effects of two endophytic fungi on physiological and biochemical indexes and *NAC* gene expression in tobacco under drought stress[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica,2024,39(1):113-119.

[23] Yousfi N, Slama I, Ghnaya T, et al. Effects of water deficit stress on growth, water relations and osmolyte accumulation in *Medicago truncatula* and *M*. *Laciniata* populations[J]. Comptes Rendus Biologies,2010,333:205-213.

[24] 陈成升 , 谢志霞 , 刘小京 . 等渗盐分、干旱胁迫下冬小麦叶片部分渗透调节物质的动态变化 [J]. 植物研究 ,2009,29(6):708-713.

Chen C S, Xie Z X, Liu X J. Dynamic transformation of the substances of osmotic adjustment in winter wheat under iso-osmotic salt and drought stresses[J]. Bulletin of Botanical Research, 2009,29(6):708-713.

[25] 牛欣益 , 马瑞 . 红砂幼苗叶片生理特性对干旱胁迫的响应 [J]. 草业科学 ,2023,40(10):2483-2492.

Niu X Y, Ma R. Effects of drought stress on leaf physiology of *Reaumuria soongorica* seedlings during the growing season[J]. Pratacultural Science,2023,40(10):2483-2492.

[26] 朱维琴 , 吴良欢 , 陶勤南 . 氮营养对干旱逆境下水稻体内可溶性渗透调节物质的影响 [J]. 浙江大学学报 (农业与生命科学版),2003,29(5):479-484.

Zhu W Q, Wu L H, Tao Q N. Effects of nitrogen nutrition on soluble osmotica in rice plants in response to drought stress[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences), 2003,29(5):479-484.

[27] 屠玲艳 , 吴学谦 , 许海顺 . 水分胁迫对三叶青叶绿体超微结构及黄酮合成关键酶的影响 [J]. 浙江农林大学学报 ,2021,38(3):577-586.

Tu L Y, Wu X Q, Xu H S. Effects of water stress on chloroplast ultrastructure and key enzymes of flavonoid synthesis in *Tetrastigma hemsleyanum*[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2021,38(3):577-586.

[28] 武祥琪 , 孙鹏 , 俞浙萍 , 等 . 杨梅 *MrSPL4* 在响应干旱和低温胁迫中的作用研究 [J]. 园艺学报 ,2024,51(5):927-938.

Wu X Q, Sun L, Yu Z P, et al. Functional study of *MrSPL4* gene in response to drought and low temperature stress in Chinese bayberry[J]. Acta Horticulturae Sinica,2024,51(5):927-938.

[29] Huang D Q, Wu W R, Abrams S R, et al. The relationship of drought-related gene expression in *Arabidopsis thaliana* to hormonal and environmental factors[J]. Journal of Experimental Botany,2008,59(11):2991-3007.

[30] 张茹艳 . 马铃薯响应干旱 - 碱性盐复合胁迫机制研究 [D]. 兰州 : 甘肃农业大学 ,2025:15-16.

Zhang R Y. Mechanisms of potato response to drought-alkaline salt combined stresses[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University,2025:15-16.

[本文编校：戴欧琳]