

## 6个欧李品种对干旱胁迫的响应及抗旱性评价

何建龙<sup>1,2</sup>, 王占军<sup>1,2</sup>, 柳超超<sup>1,2</sup>, 高嘉瑞<sup>1,2</sup>, 李小明<sup>3</sup>, 田英<sup>1,2</sup>

(1.宁夏农林科学院林业与草地生态研究所,宁夏银川750002;2.宁夏防沙治沙与水土保持实验室,宁夏银川750002;3.宁夏哈巴湖国家级自然保护区管理局,宁夏盐池751500)

**摘要:**为了解6个欧李品种在宁夏苗期的抗旱性差异,为欧李品种引进及耐旱品种筛选和栽培提供科学依据,试验采用自然干旱胁迫处理15、30 d后测定株高,以正常浇水为对照;采用PEG-6000溶液模拟极度干旱环境,测定相同干旱胁迫下农大5号、农大7号、京欧1号、农大4号、宁欧2号、农大6号6个欧李品种幼苗叶片相对含水量、叶绿素SPAD值及其他生理指标,以清水为对照。结果表明,在自然干旱条件下,欧李品种的株高相比正常浇水的对照降幅明显。PEG-6000干旱胁迫下,不同欧李品种与清水对照相比,可溶性蛋白含量、叶片相对含水量、叶片叶绿素SPAD值、SOD活性均呈现下降趋势;而丙二醛含量、脯氨酸含量、可溶性糖含量、POD活性均呈现上升趋势。利用欧李抗旱指标的隶属函数值综合评价得出,欧李品种抗旱性由强到弱排序为农大5号、农大7号、京欧1号、农大4号、宁欧2号、农大6号。农大5号和农大7号的抗旱能力较强,适应性较好,可作为宁夏地区欧李的主要推广品种。

**关键词:**欧李;干旱胁迫;抗旱评价;隶属函数法

**中图分类号:**S662.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-2481(2024)03-0086-08

### Response of Six *Prunus humilis* Varieties to Drought Stress and Evaluation of Drought Resistance

HE Jianlong<sup>1,2</sup>, WANG Zhanjun<sup>1,2</sup>, LIU Chaochao<sup>1,2</sup>, GAO Jiarui<sup>1,2</sup>, LI Xiaoming<sup>3</sup>, TIAN Ying<sup>1,2</sup>

(1.Institute of Forestry and Grassland Ecology, Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, China; 2.Ningxia Key Laboratory of Desertification Control and Soil and Water Conservation, Yinchuan 750002, China; 3.National Nature Reserve Administration of Ningxia Ha-ba Lake, Yanchi 751500, China)

**Abstract:** In order to understand the differences in drought resistance at the seedling stage of *P. humilis*, provide scientific basis for the introduction of *P. humilis* varieties and the selection and cultivation of drought resistant varieties, in this paper, the plant height was measured after natural drought stress treatment for 15 and 30 days, and normal watering was used as the control. The relative water content, SPAD value, and other physiological indexes of young leaves of six *P. humilis* varieties including Nondada 5, Nongda 7, Jingou 1, Nongda 4, Ningou 2, and Nonda 6 under the same drought stress were measured by the extremely drought environment simulated by PEG-6000 solution and water was taken as the control. The results showed that under the natural drought conditions, the plant height of the *P. humilis* varieties decreased significantly compared with that of the control. Under the drought stress of PEG-6000, the soluble protein, relative water content of leaves, relative chlorophyll SPAD value, and SOD activity of different *P. humilis* varieties showed a downward trend compared with those of the control. The content of malondialdehyde, proline, and soluble sugars, POD activity all showed an upward trend. Using the comprehensive evaluation of the membership function value of the drought resistance index for *P. humilis*, it was concluded that the drought resistance of *P. humilis* varieties was ranked from strong to weak as Nongda 5, Nongda 7, Jingou 1, Nongda 4, Ningou 2 and Nongda 6. So, the Nongda 5 and Nongda 7 had strong drought resistance and good adaptability, and were suitable to be the main promoted varieties in Ningxia.

**Key words:** *Prunus humilis*; drought stress; drought resistance evaluation; membership function method

欧李(*Prunus humilis* Bunge)是蔷薇科李属落叶小灌木,俗名又称为钙果、酸丁、山梅子等,是我

国特有的野生植物物种,其适应性较强,广泛分布于我国河北、山东、黑龙江、内蒙古等地。欧李具有

收稿日期:2023-08-11

基金项目:宁夏回族自治区青年拔尖人才培养工程;宁夏重点研发计划项目(2020BBF02027)

作者简介:何建龙(1980-),男,内蒙古阿拉善人,副研究员,主要从事林草生态学研究。

通信作者:田英(1982-),女,陕西西安人,副研究员,博士,主要从事林草资源与生态学研究。

食用价值、生态价值和经济价值<sup>[1]</sup>,在生态价值方面,可抗旱、抗寒、抗贫瘠和耐盐碱性,具有成活率高、用途广、效益高等优点<sup>[2]</sup>。

全球干旱、半干旱地区所占面积占到陆地面积的35%,干旱、土壤贫瘠是限制植物正常生长的原因之一<sup>[3-4]</sup>,西北地区处于干旱、半干旱地带,受到自然因素和人为因素的影响<sup>[4]</sup>,土壤沙漠化日趋严重,影响整个西北地区的综合性发展。面对西北地区脆弱的生态条件,引进发展经济效益高的生态果林,筛选优质的抗旱作物极为重要<sup>[5-6]</sup>。植物随着干旱胁迫的发生,叶绿素发生降解,游离脯氨酸、可溶性蛋白、可溶性糖、丙二醛等含量上升<sup>[7]</sup>。长期的干旱土壤类型和微气候环境对欧李抗旱性的影响差异较大<sup>[8-9]</sup>。植物也会因干旱胁迫时间与程度不同,对干旱胁迫的响应机制也有所不同。有研究表明,干旱胁迫会限制植物正常的生理代谢,严重的胁迫程度会导致植物死亡<sup>[10]</sup>。

欧李的抗旱性研究主要集中在植株形态和生理特性<sup>[11-12]</sup>、光合特性和超微结构<sup>[13-14]</sup>、外源物质对欧李抗旱性的影响<sup>[15]</sup>、欧李抗旱转录组<sup>[16-17]</sup>及相关基因研究等方面<sup>[18]</sup>,关于西北地区适合栽培的品种研究较少。尽管欧李可以在干旱和半干旱地区大面积的存活,但由于品种分化严重等原因,阻碍了欧李经济果林在西北地区的发展。基于此,本试验通过对宁夏引种栽培的6个欧李品种在干旱胁迫下的响应及其抗旱性评价研究,以期筛选出抗旱能力较强、适应性较好、适宜宁夏地区栽植的欧李品种提供参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

供试材料为6个欧李品种的2年生扦插苗,分别为农大4号、农大5号、农大6号、农大7号、京欧1号、宁欧2号,苗木由位于银川植物园内的种苗生物工程国家重点实验室扦插自育。2022年春季萌芽后移栽至花盆内,进行温室培养,室内温度为25℃,室外30℃。

### 1.2 试验方法

2022年5—8月试验在银川植物园内的种苗生物工程国家重点实验室的隔雨抗旱棚内开展。试验材料为欧李6个品种的幼苗,随机选取欧李每个品种幼苗120株,平均株高为25cm,并且长势一致,分别定植于40个试验花盆内,花盆直径和深度均为40cm,每个品种每盆定植3株。试验分为自

然干旱胁迫和模拟干旱胁迫两部分,各20个花盆。(1)自然干旱胁迫试验,即在正常浇水5d后开始进行为期15、30d的自然干旱胁迫,对照为正常每5d左右浇水1次,分别在自然干旱胁迫的第15、30天测量株高。(2)利用聚乙二醇(PEG 6000)模拟干旱胁迫,设置单一浓度15% PEG 6000进行胁迫处理,以等量清水浇灌作为对照,具体操作如下:将正常浇水管护的欧李幼苗从盆中取出,抖落土壤,清洗幼苗根系,加入50% Hogaland(霍格兰氏)培养液<sup>[19]</sup>。处理48h后选择光合作用旺盛的9:00—11:00测定欧李植株中部叶片的SPAD值;随机采集每个品种处理植株中部的健康无损伤的叶片2份,一份保鲜袋保存迅速带回实验室用于测定相对含水量;另一份充分混匀后装入铝箔采样袋,液氮预冷后带回实验室超低温(-80℃)保存备用。

### 1.3 测定项目及方法

卷尺测量欧李株高<sup>[20]</sup>;相对含水量采用质量法测定;超氧化物酶采用氮蓝四唑法测定;过氧化物酶采用愈创木酚法测定;使用叶绿素测定仪测定欧李叶片SPAD值;可溶性糖采用蒽酮法测定;脯氨酸采用酸性茚三酮法测定;可溶性蛋白采用考马斯亮蓝法测定;丙二醛含量采用硫代巴比妥酸法测定;过氧化氢酶采用滴定法测定<sup>[21]</sup>。

### 1.4 抗旱能力评价

采用隶属函数法评价欧李各品种的抗旱能力<sup>[22]</sup>。

$$F(X_n) = (X_n - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

式中, $F(X_n)$ 表示第 $n$ 项指标的隶属函数值, $X_n$ 表示第 $n$ 项指标的测定值, $X_{\min}$ 表示第 $n$ 项指标的最小值, $X_{\max}$ 表示第 $n$ 项指标的最大值。

### 1.5 数据分析

使用Excel 2023和SPSS 22.0软件对数据进行统计分析,运用Origin 2018进行作图。

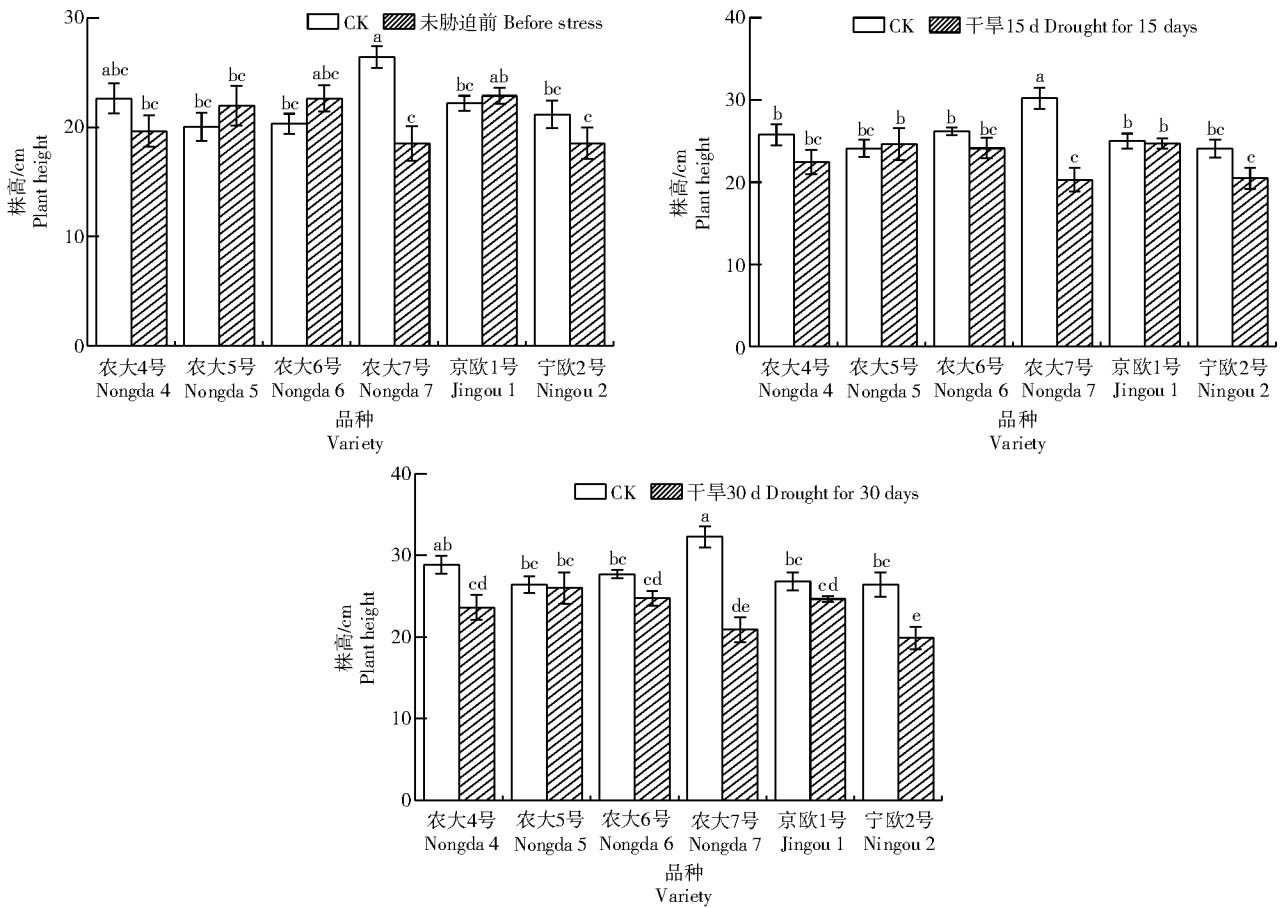
## 2 结果与分析

### 2.1 欧李各品种抗旱指标的评价

2.1.1 自然干旱胁迫对欧李株高的影响 从图1可以看出,在未开始自然干旱胁迫前与对照(正常浇水)相比,农大4号、农大7号、宁欧2号株高都低于对照,降幅分别为13.3%、30.0%、14.1%,其他品种都高于对照。在相同的自然干旱胁迫条件下,随着胁迫时间的延长,6个欧李品种的株高均不同程度低于对照,在自然干旱胁迫15d时,6个欧李品种的株高与对照相比,其中降幅最明显的为农大6号,降幅为7.8%;在自然干旱胁迫30d时,株高降幅最

大的是农大 7 号,高度为 20.9 cm;其次为宁欧 2 号、农大 4 号,分别比对照降低 35.21%、24.75% 和

18.10%;株高降幅最小的是农大 5 号,高度为 26 cm,降幅为 1.5%。



图中不同小写字母表示  $P < 0.05$  的显著差异。下图同

The different lowercase letters in the figure represented a significant difference in  $P < 0.05$ . The same as below

图 1 自然干旱胁迫下不同欧李品种的株高比较

Fig.1 Plant height of different *P. humilis* varieties under natural drought stress

2.1.2 模拟干旱胁迫对欧李叶片相对叶绿素含量 SPAD 值的影响 15% PEG-6000 模拟干旱胁迫条件下各欧李品种相对叶绿素含量 SPAD 值结果如图 2 所示。

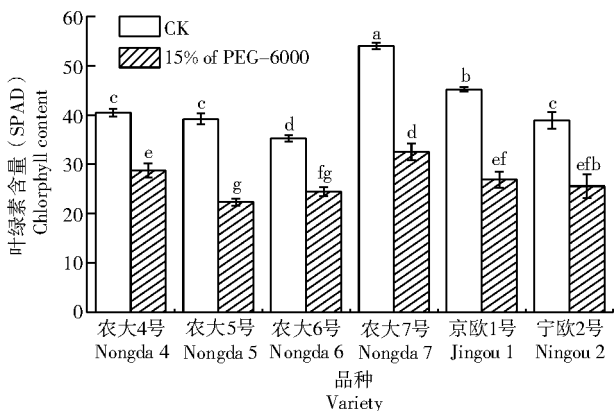


图 2 15% PEG-6000 胁迫下不同欧李品种 SPAD 值比较  
Fig.2 The SPAD of different *P. humilis* varieties under drought stress of 15% of PEG-6000

从图 2 可以看出,与对照相比,不同欧李品种的相对叶绿素含量 SPAD 均显著降低 ( $P < 0.05$ )。SPAD 降幅最大的是农大 5 号 (22.33),京欧 1 号、农大 7 号 SPAD 下降幅度略低于农大 5 号,分别比对照降低 43.06%、40.54% 和 39.71%, SPAD 下降幅度最小的是农大 4 号 (28.78),降幅为 28.86%。

2.1.3 模拟干旱胁迫对欧李叶片丙二醛含量的影响 15% PEG-6000 模拟干旱胁迫条件下 6 个欧李品种叶片中丙二醛的含量结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出,与对照相比,不同欧李品种叶片的丙二醛含量均显著升高 ( $P < 0.05$ );丙二醛含量增幅最高的为农大 4 号 (8.09  $\mu\text{mol/g}$ ),其次是农大 7 号、农大 5 号,分别比对照增加 49.68% 和 43.51%,丙二醛含量增幅较小的有宁欧 2 号、农大 6 号,分别比对照增加 22.61% 和 36.58%。

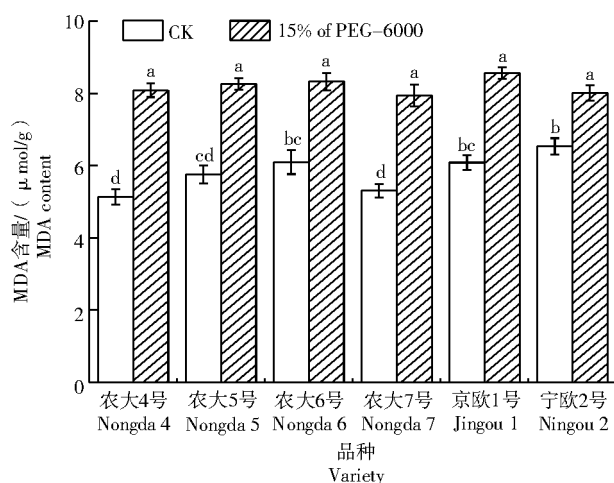


图3 15% PEG-6000胁迫下不同欧李品种丙二醛含量比较  
Fig.3 The MDA content of different *P. humilis* varieties under drought stress of 15% of PEG-6000

2.1.4 模拟干旱胁迫对欧李叶片脯氨酸含量的影响 从图4可以看出,不同欧李品种叶片中脯氨酸含量相对对照均显著提高( $P < 0.05$ )。农大5号叶片中脯氨酸含量显著增加,含量为22.314 4  $\mu\text{g/g}$ ;其次是宁欧2号和农大4号,分别比对照增加32.65%和30.33%,叶片中脯氨酸含量增幅最小的是农大7号,其含量为25.146 7  $\mu\text{g/g}$ 。

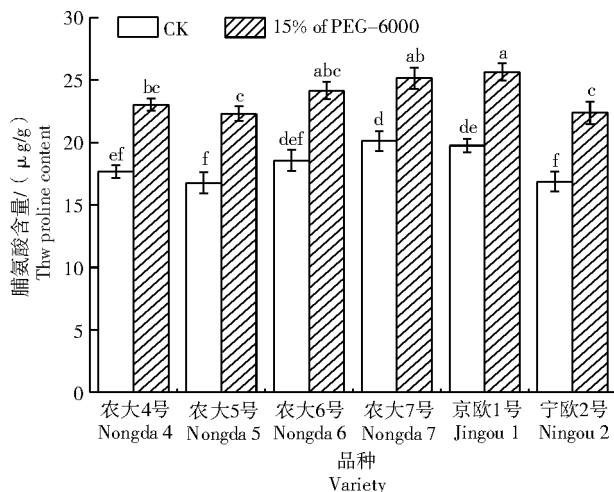


图4 15% PEG-6000胁迫下不同欧李品种脯氨酸含量比较  
Fig.4 Thw proline content of different *P. humilis* varieties under drought stress of 15% of PEG-6000

2.1.5 模拟干旱胁迫对欧李叶片可溶性糖含量的影响 由图5可知,模拟干旱胁迫下显著影响不同欧李品种叶片中的可溶性糖含量( $P < 0.05$ )。在相同的干旱胁迫条件下,与对照相比,不同欧李品种叶片中可溶性糖含量均显著增加( $P < 0.05$ )。农大6号可溶性糖含量增幅最大,含量为8.36%;农大5号、宁欧2号次之,分别比对照增加13.95%和13.19%;可溶性糖含量增幅最小是农大4号,为11.03%。

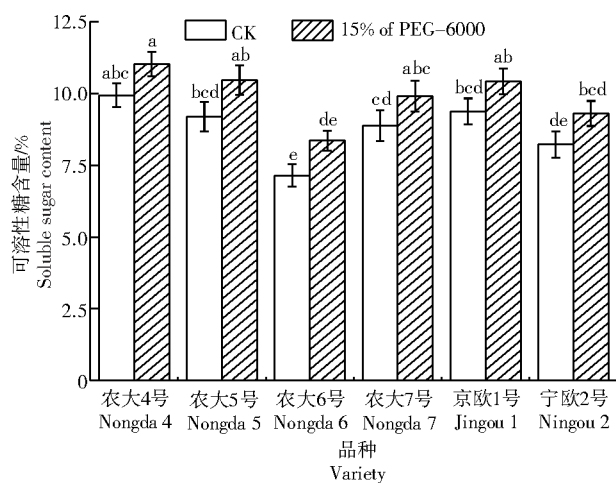


图5 15% PEG-6000胁迫下不同欧李品种可溶性糖含量比较  
Fig.5 The soluble sugar content of different *P. humilis* varieties under drought stress of 15% of PEG-6000

2.1.6 模拟干旱胁迫对欧李叶片可溶性蛋白含量的影响 由图6可知,模拟干旱胁迫下显著影响不同欧李品种叶片中可溶性蛋白含量( $P < 0.05$ )。与对照相比,模拟干旱胁迫下不同欧李品种可溶性蛋白含量均显著降低( $P < 0.05$ )。宁欧2号的可溶性蛋白含量降幅最大,含量为6.22 mg/g;农大6号、农大7号次之,分别比对照降低42.57%和37.19%;农大4号的可溶性蛋白含量降幅最小,为8.99 mg/g。

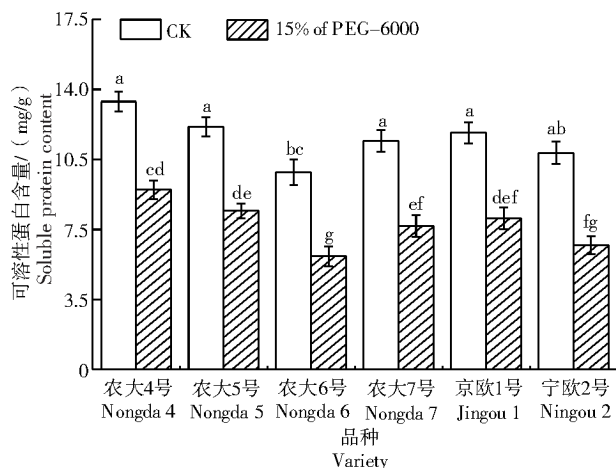


图6 15% PEG-6000胁迫下不同欧李品种可溶性蛋白含量比较  
Fig.6 The soluble protein content of different *P. humilis* varieties under drought stress of 15% of PEG-6000

2.1.7 模拟干旱胁迫对欧李叶片相对含水量的影响 由图7可知,15% PEG-6000胁迫下,各品种叶片的相对含水量与对照相比均有显著差异( $P < 0.05$ )。农大6号的叶片相对含水量下降幅度最大,含量为42.66%;其次是农大7号、农大4号,分别比对照降低37.10%和35.97%,叶片相对含水量降幅最小的是京欧1号,为52.80%。

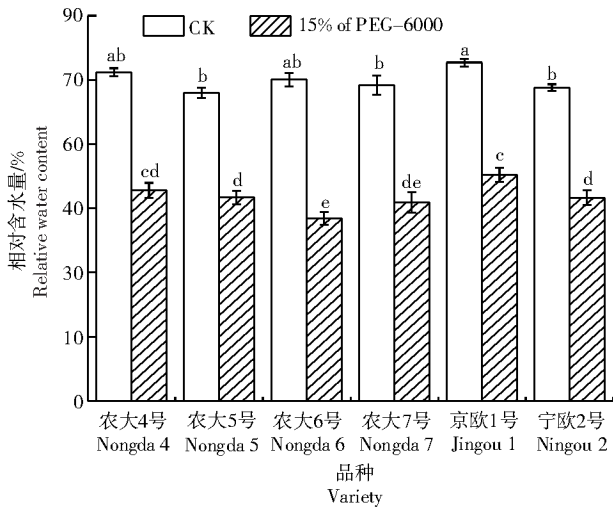


图7 15% PEG-6000胁迫下不同欧李品种相对含水量比较  
Fig.7 The relative water content of different *P. humilis* varieties under drought stress of 15% of PEG-6000

2.1.8 模拟干旱胁迫对欧李叶片抗氧化酶活性的影响 从图8可以看出,模拟干旱胁迫下,各品种SOD活性与对照相比均有显著差异( $P < 0.05$ )。在干旱胁迫下,不同欧李的SOD活性均有不同程度的降低。SOD活性下降幅度最大的是农大6号,其含量为 $2.49 \mu\text{mol}/\text{mg}$ ;其次是农大5号、宁欧2号,分别比对照降低31.69%和29.36%;SOD活性降幅最小的是京欧1号,其含量为 $3.07 \mu\text{mol}/\text{mg}$ 。

与对照组相比,在干旱胁迫下欧李品种POD活性都有不同程度的升高。POD活性上升幅度最大的为农大5号,其含量为 $8.69 \mu\text{mol}/\text{mg}$ ;其次是农大7号、京欧1号,分别比对照增加65.01%和64.24%;POD活性升幅最小的为宁欧2号,其含量为 $6.15 \mu\text{mol}/\text{mg}$ 。

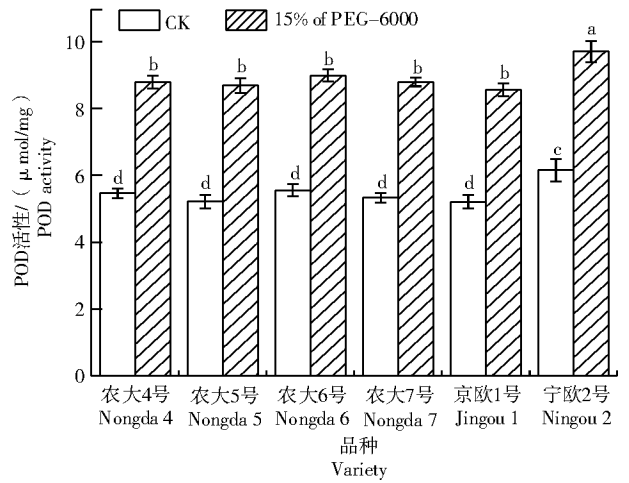
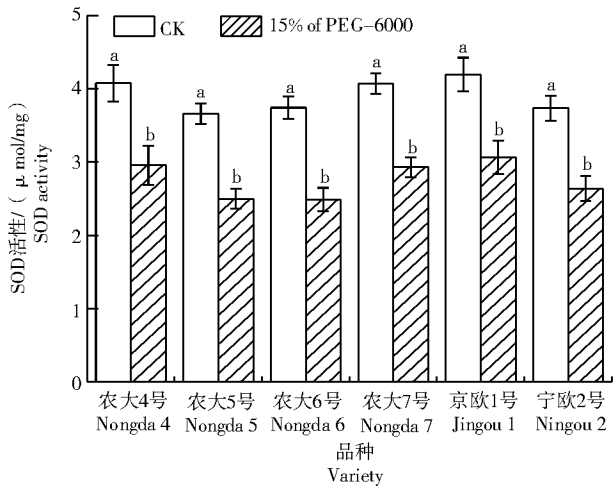


图8 15% PEG-6000胁迫下不同欧李品种抗氧化酶活性比较  
Fig.8 The antioxidant enzyme activity of different *P. humilis* varieties under drought stress of 15% of PEG-6000

2.2 欧李抗旱性综合评价

考虑由于本试验胁迫后期采样受限,抗氧化酶活性指标仅测了SOD、POD,因此,本次综合评价以株高、相对含水量、叶绿素含量以及可溶性糖含量等指标为主,通过计算这7个抗旱性相关指标的

隶属函数分值,并进行隶属函数值的统计分析,综合评价了6个欧李品种的抗旱性,隶属函数值的平均值越大,其抗旱性越强。由表1可知,抗旱能力由强到弱欧李品种依次为农大5号、农大7号、京欧1号、农大4号、宁欧2号、农大6号。

表1 欧李抗旱指标的隶属函数值及排序  
Tab.1 Membership function value and ranking of drought resistance index of *P. humilis*

品种 Variety	各指标的隶属函数值 Subordinate value of each index								均值 Average value	排序 Order
	株高 Plant height	相对含水量 Relative water content	SPAD值 SPAD value	可溶性糖含量 Soluble sugar content	可溶性蛋白含量 Soluble protein content	脯氨酸含量 Proline content	丙二醛活性 Malondialdehyde activity			
农大4号 Nongda 4	0.509	0.419	0.521	0.420	0.443	0.386	0.524	0.460	4	
农大5号 Nongda 5	0.631	0.470	0.619	0.501	0.580	0.334	0.648	0.540	1	
农大6号 Nongda 6	0.373	0.526	0.431	0.427	0.323	0.544	0.402	0.432	6	
农大7号 Nongda 7	0.548	0.460	0.478	0.586	0.593	0.561	0.552	0.540	2	
京欧1号 Jingou 1	0.430	0.461	0.393	0.584	0.648	0.503	0.540	0.508	3	
宁欧2号 Ningou 2	0.490	0.342	0.420	0.502	0.471	0.426	0.428	0.440	5	

### 3 结论与讨论

植物的耐旱性与植物本身的遗传性状有关,干旱胁迫后的植物农艺性状是直观可见的,例如,苜蓿的株高会随着胁迫时间的延长,高度逐渐增加<sup>[23]</sup>。本研究在自然干旱胁迫条件下控水15、30 d,结果表明,在干旱胁迫15 d后,欧李品种的株高相比对照降幅明显,降幅最大的为农大6号,在干旱胁迫30 d后,降幅最显著的为农大7号,这与上述研究干旱胁迫显著影响植物的株高结论相反,说明在欧李生育期内,干旱胁迫显著刺激欧李的组织器官,但当干旱胁迫连续作用时,组织器官的刺激更为明显,导致植物组织器官产生负效应<sup>[24]</sup>,欧李代谢紊乱,是株高相比对照显著下降的原因。

在干旱胁迫条件下,相对叶绿素含量下降被认为是典型的氧化应激反应的结果,干旱胁迫下相对叶绿素含量的下降是光合作用失活的主要原因<sup>[25]</sup>。在缺水条件下,叶绿素含量越稳定,作物的抗旱能力越强,不会随生态环境的变化而变化<sup>[26]</sup>。在本研究中,不同欧李品种的叶片相对叶绿素含量呈现不同程度的下降趋势,说明欧李叶片叶绿素的合成受到外界环境的干扰,光合作用不能较好地参与到欧李正常的生长状态,进而影响欧李生长。在干旱胁迫下,相对叶绿素含量降幅最大的品种为农大5号,降幅最小的品种为农大4号,说明在干旱胁迫下,农大5号、京欧1号可以积累更多的叶绿素,以维持欧李正常的生命活动。

干旱胁迫会影响活性氧自由基的增加,造成细胞膜受损,进而影响植物生长<sup>[27]</sup>。MDA含量高低一定程度上可以反映植物细胞膜的受损程度,含量越高,说明植物受损越严重,其抗逆性越强<sup>[28]</sup>。本研究表明,随着干旱胁迫程度的不断加强,不同欧李品种的MDA累积量相比对照显著增加。其中,农大4号、农大7号、农大5号的MDA含量显著增加,说明干旱胁迫会伤害欧李植物的细胞组织结构,细胞膜破坏严重,干旱胁迫显著影响欧李品种的正常生长,因此,6个欧李品种中,农大4号、农大7号、农大5号耐旱性低于其他3个欧李品种。

植物在受到干旱胁迫时,外界环境的渗透胁迫会使细胞失水,胁迫程度严重会影响细胞正常的渗透代谢,直至死亡<sup>[29]</sup>。植物相对含水量可以体现植物体内的水分情况<sup>[30]</sup>,相对含水量降幅明显,则说明叶片保持水分的能力也随之变弱。植物能够通过自身细胞的渗透调节作用来降低干旱胁迫所影

响的渗透势,保持细胞膨压。游离脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白质的作用是调节植物细胞的渗透势,这些物质还有利于细胞内活性氧的清除<sup>[31-32]</sup>。在本研究中,各欧李品种在干旱胁迫下相比对照组,游离脯氨酸、可溶性糖含量均有所增加,这与覃奎等<sup>[33]</sup>对研究池杉幼苗对于旱胁迫的生理响应结果一致,说明干旱胁迫显著影响各欧李品种的生理状态,可溶性蛋白可直接参与生命活动的多种代谢。本试验中,6个欧李品种的可溶性蛋白含量均有不同程度的降低。熊仕发等<sup>[34]</sup>研究发现,当植物处于干旱胁迫环境时,蛋白合成酶因外界环境失活,导致蛋白质的氧化和降解。本研究中,在PEG 6000模拟干旱胁迫下,6个欧李品种叶片的相对含水量均降低。降幅最大的是农大6号,说明其在相同干旱胁迫下,保持水分能力弱,这与殷世航等<sup>[35]</sup>在研究干旱胁迫对甘蔗幼苗的影响中,相对含水量下降幅度越大,甘蔗幼苗的耐旱性越弱结果一致。

植物体内的活性氧是由SOD、POD和CAT等抗氧化酶清除。SOD的工作原理是将植物中产生的氧气转化为 $H_2O_2$ ,然后POD和CAT等酶共同作用以去除 $H_2O_2$ <sup>[36]</sup>。POD保护酶是植物细胞膜的防御系统,以此减少干旱胁迫对细胞膜的伤害<sup>[37]</sup>。在本研究中,6个欧李品种在干旱胁迫下SOD活性下降,说明在干旱胁迫环境下欧李品种没有提高SOD保护酶的活性,来抵御干旱胁迫对植物的伤害,这与丁九玲等<sup>[38]</sup>研究凤梨品种对于旱胁迫的生理响应结果相反,可能是因为不同植物和种质资源间SOD和POD活性存在一定差异,欧李品种随着干旱胁迫的增强,SOD活性随之下下降,但POD活性升高,这与丁久玲等研究结果一致,说明干旱环境下欧李品种POD的活性显著变化,POD能够清除活性氧,减少干旱胁迫对细胞膜的伤害,从而降低干旱胁迫对欧李试验幼株细胞的伤害。

本研究结果表明,6个欧李品种在干旱胁迫下的生理响应存在差异,在胁迫15、30 d条件下,干旱对欧李植物的伤害可以通过增加渗透调节物质等方式减少伤害,进而提升欧李的抗旱能力。利用欧李抗旱指标的隶属函数值综合评价的方法,得出6个欧李的抗旱能力由强到弱依次为农大5号、农大7号、京欧1号、农大4号、宁欧2号、农大6号,可为抗旱育种及栽培应用提供参考。

#### 参考文献:

[1] 侯文赫,郭子微,郭彩珍,等.欧李果实发育期原花青素组分、

- 含量及抗氧化分析[J]. 山西农业科学, 2023, 51(1): 38-44.
- HOU W H, GUO Z W, GUO C Z, et al. Analysis of proanthocyanidum component, content and antioxidant ability in different periods of *Cerasus humilis* (Bge.) Sok fruit development[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2023, 51(1): 38-44.
- [2] HU B, WANG Y S, LIU G R. Properties of solar radiation over Chinese arid and semi-arid areas[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2009, 2(3): 183-187.
- [3] 邢媛, 贾馥翠, 陈凌, 等. 模拟干旱胁迫下黍稷资源抗旱性评价[J]. 山西农业科学, 2022, 50(7): 965-972.
- XING Y, JIA F C, CHENG L, et al. Drought resistance evaluation of broomcorn millet under simulated drought stress[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2022, 50(7): 965-972.
- [4] 何季, 鲍芳, 吴波, 等. 典型荒漠植物白刺叶绿素荧光特性对模拟增雨响应[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(2): 55-63.
- HE J, BAO F, WU B, et al. Response of chlorophyll fluorescence characteristics of a typical desert plant species *Nitraria tangutorum* to simulated rainfall enhancement[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(2): 55-63.
- [5] 杜俊杰. 我国大西北干旱区域退耕还林的先锋树种: 欧李[J]. 北方果树, 2001(5): 31-32.
- DU J J. European plum-volunteer for northwestern dry region returning from grain to forest in China[J]. Northern Fruits, 2001(5): 31-32.
- [6] 奥小平. 欧李的生态特性与栽培技术[J]. 山西林业科技, 2006, 35(1): 7-9.
- AO X P. Ecological character and cultivation technology of *Cerasus humilis*[J]. Shanxi Forestry Science and Technology, 2006, 35(1): 7-9.
- [7] 兰倩, 金拂晓, 陈凌, 等. 西北地区糜子资源抗旱性鉴定评价[J]. 山西农业科学, 2023, 51(1): 28-37.
- LAN Q, JIN F X, CHENG L, et al. Identification and evaluation of drought resistance of Broomcorn Millet resources in northwest China[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2023, 51(1): 28-37.
- [8] 白泽华, 李小燕, 李连国, 等. 不同立地条件下欧李的抗旱性研究[J]. 内蒙古农业科技, 2015, 43(3): 7-8, 44.
- BAI Z H, LI X Y, LI L G, et al. Study on anti-drought mechanism of *Cerasus humilis* on different site conditions[J]. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 2015, 43(3): 7-8, 44.
- [9] 丁伟, 杜俊杰, 王鹏飞, 等. 黄土丘陵沟壑区不同立地类型欧李生长差异分析[J]. 山西农业科学, 2017, 45(5): 764-768.
- DING W, DU J J, WANG P F, et al. Analysis on growth difference of Chinese dwarf cherry from different site types in hilly and Gully Regions of the Loess Plateau[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2017, 45(5): 764-768.
- [10] SHAO H B, CHU L Y, JALEEL C A, et al. Understanding water deficit stress-induced changes in the basic metabolism of higher plants - biotechnologically and sustainably improving agriculture and the environment in arid regions of the globe[J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2009, 29(2): 131-151.
- [11] 李小燕, 王欣玉, 李连国, 等. 欧李根、茎的形态解剖学研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2014, 35(3): 26-30.
- LI X Y, WANG X Y, LI L G, et al. A study of morphological anatomy of root and stem on *Cerasus humilis*[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2014, 35(3): 26-30.
- [12] 邢钟毓. 干旱胁迫下蒙原欧李的生理响应及转录组分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.
- XING Z Y. Physiological response and transcriptome analysis of Mengyuan Ouli under drought stress[D]. Hohhot: Inner Mong *Cerasus humilis* Agricultural University, 2020.
- [13] 邢钟毓, 李连国, 郭金丽, 等. 干旱胁迫对蒙原欧李光合特性及叶肉细胞超微结构的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(6): 37-42.
- XING Z Y, LI L G, GUO J L, et al. Effects of drought stress on photosynthetic characteristics and ultrastructure of mesophyll cells of Mengyuan *Cerasus humilis*[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(6): 37-42.
- [14] 段娜, 贾玉奎, 郝玉光, 等. 干旱胁迫对欧李叶绿素荧光特性的影响[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(6): 10-14.
- DUAN N, JIA Y K, HAO Y G, et al. Effects of drought stress on chlorophyll fluorescence characteristics of *Cerasus humilis*[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(6): 10-14.
- [15] 魏超. 植物呼吸对干旱胁迫的响应及外源物质的调节[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
- WEI C. The response of plant respiration to drought stress and the regulation of exogenous substances[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2012.
- [16] 孙孟超. 盐和干旱胁迫下欧李的生理响应及转录组分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
- SUN M C. Research on physiological responses to salt and drought stress in *Cerasus humilis* and its transcriptome sequencing analysis[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2013.
- [17] 周丽娟. 干旱胁迫下欧李幼苗的生理响应与差异蛋白表达分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- ZHOU L J. The response of water stress on physiological and proteomic levels in *Cerasus humilis* seedlings[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2014.
- [18] 孙丽娜. 欧李叶黄素循环基因 *VDE* 抗逆性功能的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
- SUN L N. The resistance functional studies of the xanthophyll cycle gene *VDE* in *Cerasus humilis*[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017.
- [19] 陈士超, 王猛, 汪季, 等. 紫花苜蓿种子萌发及幼苗生理特性对 PEG6000 模拟渗透势的响应[J]. 应用生态学报, 2017, 28(9): 2923-2931.
- CHEN S C, WANG M, WANG J, et al. Response of seed germination and seedling physiological characteristics of *Medicago sativa* to the simulated osmotic potential of PEG6000[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(9): 2923-2931.
- [20] 井大伟, 邢尚军, 杜振宇, 等. 干旱胁迫对杨树幼苗生长、光合特性及活性氧代谢的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(7): 1809-1816.
- JING D W, XING S J, DU Z Y, et al. Effects of drought stress on the growth, photosynthetic characteristics, and active oxygen metabolism of poplar seedlings[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(7): 1809-1816.
- [21] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

- GAO J F. Experimental guidance for plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [22] 陶宝杰, 李思崎, 景凝浩, 等. 水稻*BCAT4*基因突变株幼苗对PEG模拟干旱胁迫的响应[J]. 西北植物学报, 2022, 42(10): 1691-1699.
- TAO B J, LI S Q, JING N H, et al. Response of *BCAT4* mutant seedlings to PEG simulated drought stress in rice[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2022, 42(10): 1691-1699.
- [23] 梁少辉, 陈虹, 刘书典, 等. 核桃优良单株幼苗对干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价[J]. 天津农业科学, 2023, 29(6): 1-6.
- LIANG S H, CHEN H, LIU S D, et al. Physiologic response and evaluation of walnut seedling in superior individual plants under drought stress[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2023, 29(6): 1-6.
- [24] 陈彩锦, 师尚礼, 张尚沛, 等. 饲用燕麦对干旱胁迫的响应及抗旱性评价[J]. 种子, 2023, 42(5): 118-125.
- CHEN C J, SHI S L, ZHANG S P, et al. Response of forage oats (*Avena sativa* L.) to drought stress and evaluation of drought resistance[J]. Seed, 2023, 42(5): 118-125.
- [25] 张明晓, 于森森, 苗安宁, 等. 4个菊花品种对干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价[J]. 林业与环境科学, 2023, 39(1): 81-89.
- ZHANG M X, YU S M, MIAO A N, et al. Physiological response and drought resistance evaluation of four *Dendranthema morifolium* under drought stress[J]. Forestry and Environmental Science, 2023, 39(1): 81-89.
- [26] 齐鸣, 王俊, 张明, 等. 5种杜鹃对干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价[J]. 江西农业学报, 2022, 34(10): 52-58.
- QI M, WANG J, ZHANG M, et al. Physiological response to drought stress and drought resistance evaluation of five *Azalea* varieties[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2022, 34(10): 52-58.
- [27] 周丽霞, 杨蒙迪, 赵志浩. 不同油棕品种对干旱胁迫及复水的生理响应及抗旱性评价[J]. 分子植物育种, 2023, 21(12): 4066-4077.
- ZHOU L X, YANG M D, ZHAO Z H. Physiological response and resistance evaluation of oil palm varieties under drought stress[J]. Molecular Plant Breeding, 2023, 21(12): 4066-4077.
- [28] 孙颖, 孟儒, 臧彤彤, 等. 干旱胁迫下3种地被植物的生理响应及其抗旱性评价[J]. 分子植物育种, 2022, 20(12): 4121-4128.
- SUN Y, MENG R, ZANG S T, et al. Physiological response and drought resistance evaluation of three ground cover plants under drought stress[J]. Molecular Plant Breeding, 2022, 20(12): 4121-4128.
- [29] 许爱云, 曹兵, 谢云. 干旱风沙区煤炭基地12种草本植物对干旱胁迫的生理生态响应及抗旱性评价[J]. 草业学报, 2020, 29(10): 22-34.
- XU A Y, CAO B, XIE Y. Physiological-ecological responses of twelve herbaceous plant species under drought stress and evaluation of their drought resistance when planted in coal producing basis in arid windy and sandy areas[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(10): 22-34.
- [30] 王竞红, 陈鹏, 陈艾, 等. 3种观赏草苗期对干旱胁迫的响应及抗旱性评价[J]. 草业科学, 2019, 36(5): 1266-1274.
- WANG J H, CHEN P, CHEN A, et al. Effects of drought stress on physiological and growth characteristics of the seedlings of three ornamental grasses[J]. Prataculturae Sinica, 2019, 36(5): 1266-1274.
- [31] 曾艳, 金晓玲, 张亚平, 等. 大叶榉‘恨天高’对干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 280-285.
- ZENG Y, JIN X L, ZHANG Y P, et al. Physiological responses of *Zelkova schneideriana* ‘hentiangao’ to different drought stresses during seedling stage and its evaluation of drought resistance[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(1): 280-285.
- [32] 范志霞, 李绍才, 孙海龙. 多效唑作用下紫穗槐对干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价[J]. 草业学报, 2017, 26(3): 132-141.
- FAN Z X, LI S C, SUN H L. Physiological response of *Amorpha fruticosa* drought stress under paclobutrazol application and an evaluation of drought resistance[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2017, 26(3): 132-141.
- [33] 覃奎, 刘秀, 马道承, 等. 3个种源池杉幼苗对干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价[J]. 山东农业科学, 2022, 54(1): 30-37.
- QIN K, LIU X, MA D C, et al. Physiological response to drought stress and drought resistance evaluation of *Taxodium distichum* var. *imbricatum* (nuttall) croom seedlings from three provenances[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2022, 54(1): 30-37.
- [34] 熊仕发, 吴立文, 陈益存, 等. 不同种源白栎幼苗叶片对干旱胁迫的响应及抗旱性评价[J]. 生态学杂志, 2020, 39(12): 3924-3933.
- XIONG S F, WU L W, CHEN Y C, et al. Response of leaf of *Quercus fabri* seedlings from different provenances to drought stress and drought resistance evaluation[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(12): 3924-3933.
- [35] 殷世航, 周赛, 黄霄宇, 等. 中蔗系列新品种对干旱胁迫的响应及抗旱性评价[J]. 南方农业学报, 2020, 51(6): 1339-1345.
- YIN S H, ZHOU S, HUANG X Y, et al. Physiological response and evaluation of sugarcane Zhongzhe varieties to drought stress[J]. Journal of Southern Agriculture, 2020, 51(6): 1339-1345.
- [36] 代小冬, 徐心志, 朱灿灿, 等. 谷子苗期对不同程度干旱胁迫的响应及抗旱性评价[J]. 作物杂志, 2016(1): 140-143.
- DAI X D, XU X Z, ZHU C C, et al. Seeding stage response to different water availability and drought resistance evaluation of foxtail millet[J]. Crops, 2016(1): 140-143.
- [37] 蒯亚平, 杨成行, 苏家豪, 等. 6种高寒禾草对干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价[J]. 草业科学, 2021, 38(12): 2397-2405.
- LIN Y P, YANG C H, SU J H, et al. Physiological response of six alpine grass varieties to drought stress and their drought resistance evaluation[J]. Prataculturae Sinica, 2021, 38(12): 2397-2405.
- [38] 丁久玲, 孟海涛, 郑凯. 10个空气凤梨品种对干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价[J]. 浙江农业科学, 2022, 63(11): 2677-2683.
- DING J L, MENG H T, ZHENG K. Physiological response and drought resistance evaluation of ten *Tillandsia* varieties[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2022, 63(11): 2677-2683.