

DOI:10.14188/j.ajsh.20241029001

干旱胁迫对5个金银花品种生理生化特征的影响

潘占兵¹, 杨慧², 左忠^{2*}, 范金鑫², 黄婷²

(1. 宁夏农林科学院 农作物研究所, 宁夏 银川 750002;

2. 宁夏农林科学院 林业与草地生态研究所, 宁夏 银川 750002)

摘要: 金银花具有良好的药用价值和保健功能。为筛选适宜宁夏压砂地种植的金银花品种, 依据中卫市沙坡头区兴仁镇硒砂瓜种植区田间持水量, 分别设置 21.93%、15.47%、10.31%、6.45%、3.87% 5 个水分梯度, 研究 5 个土壤水分梯度下四季金银花、红色金银花、北花 1 号金银花、九丰 1 号金银花和平邑山花子金银花叶片抗氧化酶活性、渗透调节物质含量变化趋势以及抗旱能力强弱。结果显示, 5 个金银花品种超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化物酶(POD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性、丙二醛(MDA)含量、脯氨酸(Pro)和可溶性蛋白(SP)含量随干旱胁迫程度增强呈增加趋势。相关性分析表明, 干旱胁迫与各生理指标呈显著正相关。隶属函数综合评价得出, 抗旱能力为平邑山花子金银花>红色金银花>北花 1 号金银花>四季金银花>九丰 1 号金银花, 前 3 个品种可以作为宁夏压砂地金银花抗旱优选品种, 为宁夏压砂地金银花品种的选择提供了理论依据和实践指导。

关键词: 压砂地; 干旱胁迫; 金银花; 生理生化特征; 抗旱性**中图分类号:** Q945.78**文献标志码:** A**文章编号:** 2096-3491(2025)01-0081-09

Effects of drought stress on physiological and biochemical characteristics of five honeysuckle varieties

PAN Zhanbing¹, YANG Hui², ZUO Zhong^{2*}, FAN Jinxin², HUANG Ting²

(1. Institute of Crop, Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, Ningxia, China;

2. Institute of Forestry and Grassland Ecology, Ningxia Academy of Agricultural and Forestry Sciences, Yinchuan 750002, Ningxia, China)

Abstract: Honeysuckle has good medicinal value and health care function. In order to screen honeysuckle varieties suitable for planting in pressed sandy land in Ningxia, five moisture gradients of 21.93%, 15.47%, 10.31%, 6.45% and 3.87% were set based on the field water holding capacity of selenium honeysuckle planting area in Xingren Town, Shapotou District, Zhongwei City. The antioxidant enzyme activity, osmoregulatory substance content and drought tolerance of leaves of four season honeysuckle, red honeysuckle, Beiflora No. 1 honeysuckle, Jiufeng No. 1 honeysuckle and Pingyi Shanhuazi honeysuckle were investigated under the five moisture gradients. The results showed that the superoxide dismutase (SOD) activity, peroxidase (POD) activity, catalase (CAT) activity, malondialdehyde (MDA) content, proline (Pro) and soluble protein (SP) content of five honeysuckle varieties increased with the increase of drought stress. Correlation analysis showed that drought stress was significantly positively correlated with various physiological indexes. According to the comprehensive evaluation of the membership function, the drought resistance ability was Pingyi Shanhuazi honeysuckle > red honeysuckle > Beiflora No. 1 honeysuckle > four season honeysuckle > Ji-

收稿日期: 2024-10-29 修回日期: 2024-12-11 接受日期: 2025-02-12

作者简介: 潘占兵(1975-),男,副研究员,主要从事荒漠化防治与生态环境建设方面的研究。因病于2024年12月5日逝世

* 通讯联系人: 左忠(1976-),男,硕士,研究员,主要从事土壤风蚀监测与荒漠化防治技术研究, E-mail: nxzuozhong@163.com

基金项目: 宁夏自然科学基金项目(2022AAC02055); 2022年中央财政林业科技推广示范项目([2022]ZY09); 宁夏退耕还林工程效益监测项目

引用格式: 潘占兵, 杨慧, 左忠, 等. 干旱胁迫对5个金银花品种生理生化特征的影响[J]. 生物资源, 2025, 47(1): 81-89.

Pan Z B, Yang H, Zuo Z, et al. Effects of drought stress on physiological and biochemical characteristics of five honeysuckle varieties [J]. Biotic Resources, 2025, 47(1): 81-89.

ufeng No. 1 honeysuckle. In summary, Pingyi Shanhuazi honeysuckle, red honeysuckle and Beiflora No. 1 honeysuckle can be used as drought-resistant varieties of honeysuckle in Ningxia pressed sandy land. Our results provide a theoretical basis and practical guidance for the selection of honeysuckle varieties in pressed sandy land in Ningxia.

Key words: pressed sandy land; drought stress; honeysuckle; physiological and biochemical characteristics; drought resistance

0 引言

全球气温升高和空气湿度降低、降水格局与强度变化致使大气需水量增加和土壤可利用水分含量降低,植物生长与发育受到干旱胁迫的影响^[1]。植物根系首先感知到干旱胁迫信号,再通过木质部和韧皮部将信号传导至植物各器官,促使植物启动气孔调节、渗透调节、抗氧化酶防御系统等以缓解干旱胁迫带来的损伤^[2-3]。依据中南林业科技大学苗圃田间持水量(56.55%)设置土壤含水量为42.41%~45.24%、14.14%~16.97% 2个干旱胁迫梯度^[4]。依据北京市大东流苗圃田间持水量(31.00%)设置31%、18.6%、15.5%、12.4% 4个干旱胁迫梯度^[5];依据塔里木大学园艺实验站田间持水量(24.2%)设置17%~19%、12%~14%、7%~10%、4%~5% 4个干旱胁迫梯度^[6],均发现依据田间持水量设置不同干旱胁迫梯度对植株生理生化特征影响显著。可见,根据不同地区田间持水量设置干旱胁迫梯度,深入研究干旱胁迫下植物抗氧化酶系统与渗透调节等方面的响应规律,对了解该区植物应对干旱适应能力、制定植被管理策略以及维护生态系统稳定性至关重要^[7]。

干旱胁迫引起植物体内生理生化代谢紊乱,造成活性氧(reactive oxygen species, ROS)和丙二醛(malondialdehyde, MDA)等有害物质增多、生物膜稳定性降低、蛋白质变性增加等^[8]。植物主要通过积累脯氨酸(Pro)、可溶性蛋白(soluble protein, SP)等渗透调节物质来提高细胞持水力和细胞液浓度以维持细胞膨压和正常的生理活动^[9],也会调动过氧化物酶(peroxidase, POD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)等酶促防御系统分解H₂O₂、清除活性氧等以减轻干旱胁迫对于植物的危害^[10]。对3种一年生草本植物进行干旱胁迫研究发现^[11],轻度和中度干旱胁迫下,一年生草本叶片脯氨酸含量、可溶性蛋白含量增加,丙二醛含量维持在较低水平,而重度干旱胁迫下,渗透调节作用达到极限,丙二醛含量达到最高值;研究发现,4种园林植物幼苗SOD、POD和CAT活性在干旱胁迫梯度下变化趋势不一致^[12],且利用隶属函数评价发现蒙桑(*Morus mongolica*)抗旱性最强。

金银花为忍冬科(Caprifoliaceae)植物忍冬(*Lonicera japonica* Thunb)的干燥花蕾或带初开的花,药效成分主要有绿原酸、异绿原酸、咖啡酸、木犀草苷、木犀草素、槲皮素等^[13],常用于治疗痈肿疔疮、喉痹、风热感冒、温病发热等疾病^[14]。目前关于金银花的研究主要集中在药用成分提取等方面^[15],也有研究提及金银花抗旱能力极强^[16],但不同金银花品种叶片对于干旱胁迫的生理生化特征等方面的研究尚未涉及。此外,宁夏中部中卫市沙坡头区、中宁县和吴忠市红寺堡区主要应用地表覆砂这一节水保护性耕作栽培模式大面积种植晒砂瓜,由于长期种植结构单一、机械碾压等因素,致使晒砂瓜种植区连作障碍、土壤沙化与植被退化等生态问题相继出现^[17-18]。因此,压砂地种植区通过引进金银花这一适应能力较强的种质资源以缓解现有的生态问题,从而促进压砂地植物种类、品种多元化和区域经济可持续发展。

综上,根据宁夏晒砂瓜种植产区田间持水量,研究不同干旱胁迫梯度下四季金银花、红色金银花、平邑山花子金银花、北花1号金银花和九丰1号金银花植株叶片抗氧化酶活性、渗透调节物质含量变换趋势等,以期揭示金银花抗旱机理,建立金银花抗旱优质评价指标体系,筛选出适宜宁夏中卫压砂地种植的金银花品种,为压砂地种植结构调整和金银花产业绿色健康发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验水分的胁迫梯度设计

研究区位于宁夏中卫沙坡头区兴仁镇晒砂瓜种植区(36°99′05.94″N, 105°23′45.09″E),该区年均降雨量仅180~200 mm,主要集中于6月—9月,年均蒸发量高达2 100~2 400 mm。2022年6月—9月采用环刀法测定该区1a、3a、5a、10a、15a与20a农田0~20 cm与20~40 cm田间持水量为25.78%±3.45%。依据田间持水量设置5个水分梯度,即田间持水量的85%为对照(CK)、田间持水量的60%为干旱胁迫梯度处理1(T1)、田间持水量的40%为干旱胁迫梯度处理2(T2)、田间持水量的25%为干旱胁迫梯度处理3(T3)和田间持水量的15%为干旱胁迫梯度处理4(T4),各处理组土壤含

水量分别为 21.93%、15.47%、10.31%、6.45%、3.87%。

1.2 试验材料与方法

试验在宁夏农林科学院农作物研究所宁夏银川市永宁县王太综合试验基地(38°14'44.4"N, 106°14'32.9"E)进行,该区属温带大陆性干旱气候,年均气温 8.7℃,夏季各月平均气温在 20℃以上,年均降水量约 200 mm。试验所用金银花品种由山东平邑县九间棚农业科技园公司提供,株高为(146.64±17.62)cm。2022年5月,取75个陶瓷花盆(高55 cm,外径30 cm),平均分成5组,用作5个金银花品种的栽培,再将每个品种的15个花盆分为5组分别作为21.93%(CK)、15.47%(T1)、10.31%(T2)、6.45%(T3)、3.87%(T4)5个水分梯度,每组3个重复。将花盆坐地后,装入土壤湿度传感器,再将长势基本一致的3年生四季金银花(SJ)、红色金银花(HS)、北花1号金银花(BF)、九丰1号金银花(JF)、平邑山花子金银花(PY)幼苗栽至对应的花盆中,适量浇水确保苗木正常生长至定苗成功。后期通过土壤湿度传感器控制的电磁阀精确控制各干旱梯度。

1.3 叶片生理指标测定

2023年7月将每个处理组3盆苗木叶片剪碎混匀后,参照文献[19]的方法,分别用愈创木酚法、紫外吸收法和氮蓝四唑光还原法测定 POD、CAT 和 SOD 活性;分别用硫代巴比妥酸法、考马斯亮蓝 G-250 法和茚三酮染色法测定 MDA、SP 和 Pro 含量。

1.4 数据处理

所有数据经正态分布和方差齐性检验后,采用双因素方差分析(two way ANOVA)探究金银花品种、干旱胁迫梯度及其交互作用对叶片生理参数的影响。用单因素方差分析(one way ANOVA)对同一品种不同干旱胁迫梯度处理下以及同一干旱胁迫梯度不同品种幼苗叶片生理参数进行显著性比较,显著水平为 0.05。采用皮尔逊(Pearson)分析法分析干旱胁迫以及各生理指标之间的相关性。所有统计分析均在 SPSS 25.0 软件中进行,采用 Origin 2024 作图。采用隶属函数法^[20]对5个金银花品种抗旱性进行评价,计算公式如下:

$$X(u)=(X-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min})$$

式中, $X(u)$ 为指标 X 测定值的均值; $X_{\min}$ 、 $X_{\max}$ 为 X 的最小值和最大值。求出每个品种在不同处理下各个指标的隶属值,然后把不同处理下的隶属值累加求平均值,通过比较各品种隶属值的大小,确定5个品

种抗旱能力强弱。

2 结果与分析

2.1 幼苗叶片细胞抗氧化能力与膜系统

由表1可以看出,处理、品种以及两者交互作用对 SOD 活性、POD 活性、CAT 活性和 MDA 含量的影响均达极显著水平($P<0.01$)。由图1可以看出,SOD、POD 和 CAT 活性以及 MDA 含量均随干旱胁迫梯度增加呈现增大趋势。对照(CK)与 T1 处理下,北花1号金银花 SOD 活性显著高于其他品种,九丰1号金银花 POD 活性显著高于其他品种,T2、T3 和 T4 干旱胁迫处理下,北花1号金银花 SOD 活性显著低于平邑山花子金银花,显著高于其他品种,平邑山花子金银花 POD 活性显著高于其他品种($P<0.05$)。而 CK 处理下,红色金银花和平邑山花子金银花 CAT 活性显著高于其他品种,T2 干旱胁迫北花1号金银花和平邑山花子金银花 CAT 活性显著高于其他品种,四季金银花 CAT 活性由 T3 处理 44.30 U/g 增至 T4 干旱胁迫梯度处理 367.02 U/g,差异显著($P<0.05$)。

CK 处理下,MDA 含量由大到小为平邑山花子金银花>九丰1号金银花>北花1号金银花>四季金银花和红色金银花,且差异显著($P<0.05$);T1 处理下,四季金银花和北花1号金银花 MDA 含量显著高于红色金银花,显著低于九丰1号金银花和平邑山花子金银花($P<0.05$);T2 与 T3 处理下,四季金银花和九丰1号金银花 MDA 含量显著低于平邑山花子金银花,显著高于红花金银花和北花1号金银花($P<0.05$);T4 处理下,四季金银花和北花1号金银花显著高于红色金银花,显著低于九丰1号金银花和平邑山花子金银花 MDA 含量($P<0.05$)。

2.2 幼苗叶片渗透调节物质

处理、品种及两者交互作用对脯氨酸含量和可溶性蛋白含量均达极显著水平($P<0.01$)(表1)。由图2可以看出,5个金银花品种脯氨酸含量随干旱胁迫梯度的增加呈增加的趋势,而各个品种可溶性蛋白的变化趋势不一致。CK、T1、T2 处理下,四季金银花和九丰1号金银花脯氨酸与可溶性蛋白含量显著低于其他品种;T3 和 T4 处理下,红色金银花脯氨酸含量最高,分别为 0.538 2 μg/g、0.690 3 μg/g,显著高于其他品种($P<0.05$)。北花1号金银花和平邑山花子金银花可溶性蛋白含量由 T2 处理 2.409 5 g/L、1.796 2 g/L 增至 T3 处理的 3.897 3 g/L 和 3.758 5 g/L,且显著高于其他品种

表1 不同干旱胁迫梯度下5个金银花品种生理指标的双因素方差分析

Table 1 Two-way analysis of variance of physiological indexes of five honeysuckle varieties under different drought stress gradients

生理参数	处理		品种		处理*品种	
	F	P	F	P	F	P
脯氨酸(Pro)	1 157.88	< 0.001	410.22	< 0.001	41.36	< 0.001
可溶性蛋白(SP)	114.89	< 0.001	393.47	< 0.001	7.71	< 0.001
超氧化物歧化酶(SOD)	410.04	< 0.001	446.74	< 0.001	54.39	< 0.001
过氧化物酶(POD)	661.94	< 0.001	181.47	< 0.001	37.54	< 0.001
过氧化氢酶(CAT)	829.24	< 0.001	90.94	< 0.001	130.75	< 0.001
丙二醛(MDA)	97.15	< 0.001	85.88	< 0.001	37.54	< 0.001

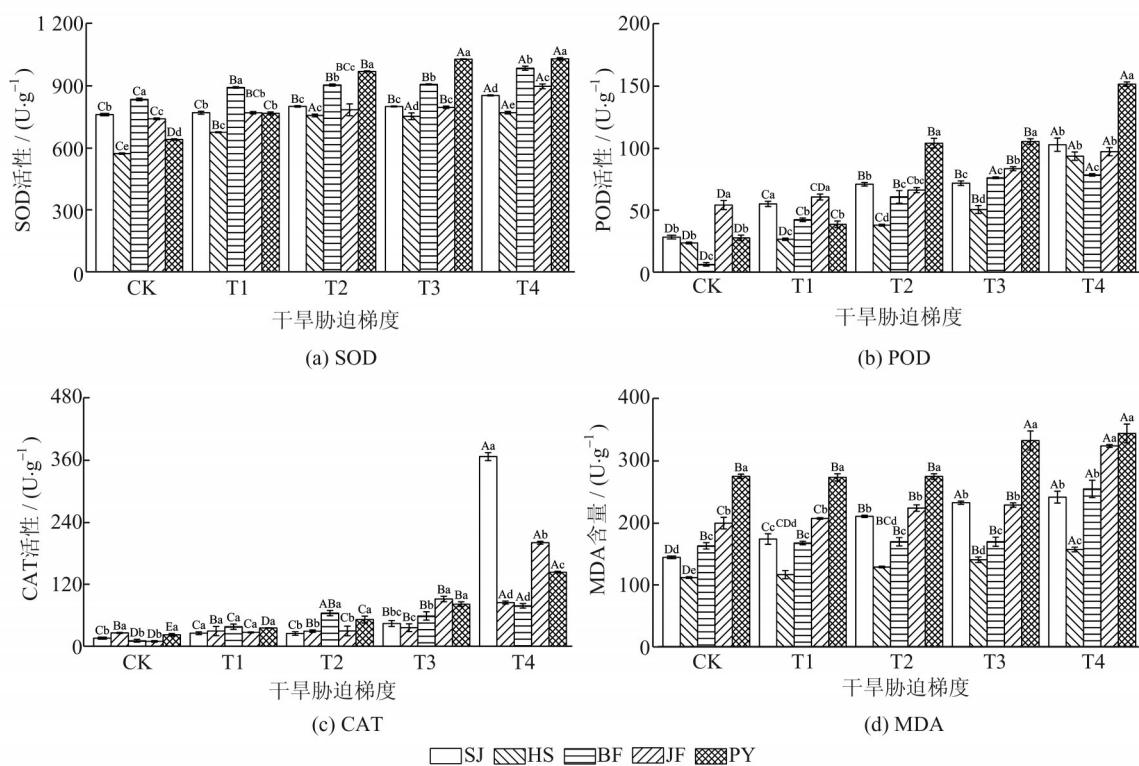


图1 干旱胁迫对5个金银花品种抗氧化能力与丙二醛含量的影响

Figure 1 Effects of drought stress on antioxidant capacity and malondialdehyde content of five honeysuckle varieties

注:小写字母表示同一干旱胁迫梯度下不同品种差异显著,大写字母表示同一品种不同干旱胁迫梯度下差异显著;SJ,四季金银花;HS,红色金银花;BF,北花1号金银花;JF,九丰1号金银花;PY,平邑山花子金银花

Note: lowercase letters indicate significant differences between different varieties under the same drought stress gradient, and uppercase letters indicate significant differences between different varieties under different drought stress gradients; SJ, four season honeysuckle; HS: red honeysuckle; BF, Beihua 1 honeysuckle; JF, Jiufeng 1 honeysuckle; PY, Pingyishanhuazi honeysuckle

($P < 0.05$)。

2.3 干旱胁迫下5个金银花品种生理指标间相关性分析

干旱胁迫处理分别与SOD活性、POD活性、CAT活性、MDA含量、Pro含量以及SP含量呈极显著正相关($P < 0.01$),品种分别与SOD活性、POD活性、MDA含量与SP含量呈极显著正相关($P <$

0.01),SOD活性分别与POD活性、CAT活性、MDA含量、Pro含量和SP含量呈极显著正相关($P < 0.01$),POD活性分别与CAT活性、MDA含量、Pro含量和SP含量呈极显著正相关($P < 0.01$),CAT活性分别与MDA含量和Pro含量呈极显著正相关($P < 0.01$),MDA含量和Pro含量分别与SP含量呈极显著正相关($P < 0.01$)(表2)。

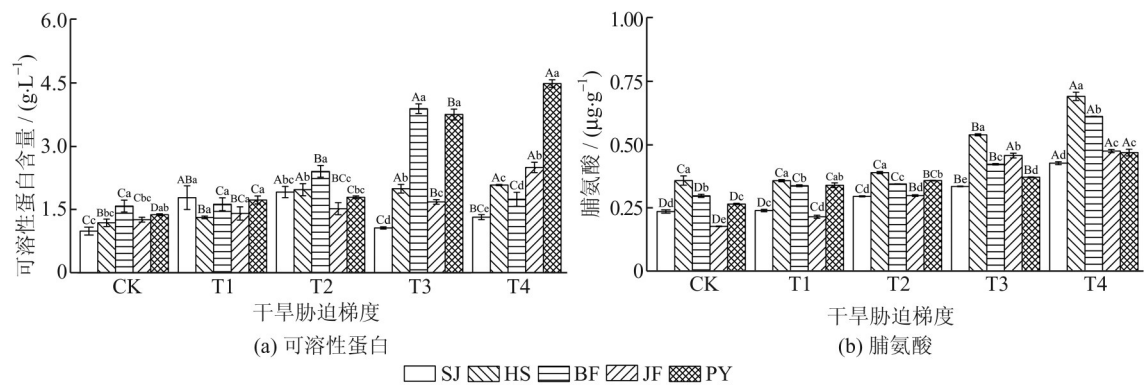


图2 干旱胁迫对5个金银花品种渗透调节物质含量的影响

Figure 2 Effects of drought stress on the content of osmoregulatory substances in five honeysuckle varieties

注：小写字母表示同一干旱胁迫梯度下不同品种差异显著，大写字母表示同一品种不同干旱胁迫梯度下差异显著；SJ，四季金银花；HS，红色金银花；BF，北花1号金银花；JF，九丰1号金银花；PY，平邑山花子金银花
Note: lowercase letters indicate significant differences between different varieties under the same drought stress gradient, and uppercase letters indicate significant differences between different varieties under different drought stress gradients; SJ, four season honeysuckle; HS, red honeysuckle; BF, Beihua 1 honeysuckle; JF, Jiufeng 1 honeysuckle; PY, Pingyishanhuaizi honeysuckle

表2 干旱胁迫下5个金银花品种生理指标相关性分析

Table 2 Correlation analysis of physiological indexes of five honeysuckle varieties under drought stress

指标	干旱胁迫	品种	SOD 活性	POD 活性	CAT 活性	MDA 含量	Pro 含量
品种	0.000						
SOD 活性	0.602**	0.344**					
POD 活性	0.805**	0.282*	0.708**				
CAT 活性	0.652**	−0.05	0.369**	0.601**			
MDA 含量	0.434**	0.648**	0.594**	0.670**	0.419**		
Pro 含量	0.787**	−0.041	0.315**	0.454**	0.405**	0.098	
SP 含量	0.512**	0.383**	0.660**	0.618**	0.213	0.436**	0.340**

* 代表 $P < 0.05$, ** 代表 $P < 0.01$

2.4 5个金银花品种抗旱性评价

5个金银花品种抗旱系数均值排序为平邑山花子金银花>红色金银花>北花1号金银花>四季金银花>九丰1号金银花，而抗氧化与渗透调节能力均值排序为平邑山花子金银花>北花1号金银花>红色金银花>四季金银花>九丰1号金银花。九丰1号金银花隶属函数平均值最低，为0.37，表明其抗旱性最弱，其他品种隶属函数值在0.42~0.45。平邑山花子金银花和北花1号金银花抗氧化与渗透调节系数均值最高，分别为0.467、1.463，抗旱性筛选和育种的参考对象主要倾向于这两者(表3)。

3 讨论

3.1 抗氧化能力对干旱胁迫的适应性改变

干旱胁迫下，幼苗气孔关闭导致二氧化碳扩散和生理生化紊乱，大量 O_2^- 和 H_2O_2 等具有强氧化能力的ROS产生造成氧化胁迫^[21]，植物细胞通过启动

酶促防御系统清除ROS以维持细胞膜稳定和光合机构正常运转^[22]。已有研究表明，SOD通过歧化作用将 O_2^- 转化为 H_2O_2 和 O_2 ，而POD和CAT进一步将 H_2O_2 分解为 H_2O 以降低ROS含量，最终减缓细胞受损程度^[23]。本研究发现，SOD、POD与CAT活性随干旱胁迫程度增强呈增加趋势，SOD活性在550~1100 U/g左右，而POD活性和CAT活性分别在5~160 U/g和9~370 U/g，土壤含水量降至3.87%，POD和CAT活性增幅显著，与桉楠(*Phoebe zhennan*)SOD活性和CAT活性随干旱胁迫增强显著升高这一结果基本一致^[24]。由此可见，植物遭遇干旱胁迫时，细胞调动SOD、POD与CAT等酶协同清除氧自由基以适应干旱胁迫，且SOD在干旱胁迫期间发挥抗氧化作用相对其他两种酶更大，而POD和CAT活性在干旱胁迫梯度最大时发挥更加重要的调节作用^[2, 10]。

本研究还发现，不同品种间应对干旱胁迫抗氧

表3 5个金银花品种抗旱性综合评价

Table 3 Comprehensive evaluation of drought resistance of five honeysuckle varieties

参数	四季金银花(SJ)	红色金银花(HS)	北花1号金银花(BH)	九丰1号金银花(JF)	平邑山花子金银花(PY)
SOD 活性	0.390	0.673	0.465	0.364	0.633
POD 活性	0.503	0.327	0.644	0.422	0.466
CAT 活性	0.227	0.259	0.580	0.325	0.368
MDA 含量	0.579	0.422	0.239	0.298	0.376
Pro 含量	0.371	0.328	0.335	0.495	0.468
SP 含量	0.459	0.584	0.289	0.334	0.402
均值	0.421	0.432	0.425	0.373	0.452
排序	4	2	3	5	1

化能力明显不同,由大到小为北花1号金银花、平邑山花子金银花、红色金银花、四季金银花、九丰1号金银花。北花1号金银花叶片SOD活性高,最先激活抗氧化酶启动保护防御措施;而平邑山花子金银花在干旱胁迫作用下通过快速激活抗氧化酶减缓干旱损伤;九丰1号金银花在干旱胁迫处理下,抗氧化保护系统启动较慢,植物可能受干旱胁迫损伤较为严重^[25]。

3.2 细胞膜系统对干旱胁迫的适应性改变

MDA是细胞膜脂质过氧化主要产物之一,其含量直接反映植物受到干旱胁迫时细胞膜透性和膜结构的变化^[26]。本研究发现,MDA含量随干旱胁迫梯度增加呈升高趋势,在土壤含水量为3.87%时达到最大,这与油茶(*Camellia oleifera*)受干旱胁迫叶片MDA含量变化趋势基本一致^[27]。在轻度干旱胁迫条件下,机体能够迅速激活SOD、POD和CAT协同清除ROS,MDA含量维持在较低水平,干旱胁迫作用增加,生理活动因细胞体内过度缺水而运行不畅致使抗氧化酶生理活性较低,膜脂过氧化反应程度加剧,MDA含量达到最高^[8,10]。此外,细胞膜系统因品种不同差异显著,红色金银花自身和干旱胁迫处理下MDA含量均低于其他品种,说明红色金银花叶片细胞膜系统完整性最高,可见干旱胁迫作用对红色金银花影响较小;北花1号金银花MDA含量除3.87%干旱胁迫处理下均保持稳定,细胞膜对膜脂过氧化作用耐受力高,间接证明其抗旱能力较强^[28]。

3.3 渗透调节物质对干旱胁迫的适应性改变

脯氨酸和可溶性蛋白是重要的渗透调节物质,其含量增加可以提高细胞持水力、保护原生质膜结构和维持细胞内外渗透平衡,提高植株对干旱的抵抗能力^[29-30]。本研究发现,随着干旱胁迫增加,幼苗叶片脯氨酸含量显著上升,而可溶性蛋白含量变化趋势不一致。土壤含水量为21.93%时,幼苗体内

渗透调节物质含量较低,可能是因为幼苗吸水与保水能力较高,细胞内外渗透维持平衡状态^[31]。当土壤含水量降低植物遭受干旱胁迫时,脯氨酸和可溶性蛋白含量上升以降低细胞水势,从而阻止细胞膜解离,增强细胞保水能力,稳定细胞结构^[32]。

研究发现,牧歌37CR和巨能苜蓿根系的可溶性蛋白含量显著低于中苜1号^[25],正常供水处理下,牧歌37CR脯氨酸含量显著低于巨能和中苜1号。与以上研究结果一致,本研究发现,5个金银花品种渗透调节能力由大到小为红色金银花、平邑山花子金银花、四季金银花、九丰1号金银花和北花1号金银花。可能是因为红色金银花和平邑山花子金银花凭借自身具有高渗透调节物质含量以及干旱胁迫下快速积累渗透调节物质以适应干旱胁迫^[33]。

3.4 金银花抗旱性评价

植物抗旱性受形态、生理生化特征等多方面影响,已有研究采用主成分分析、聚类分析、隶属函数法等对植物抗旱性进行评价^[34-35]。本研究采用相关性分析对5个金银花品种叶片生理指标进行分析得出,干旱胁迫与各指标之间呈显著正相关,抗氧化酶活性与渗透调节物质含量呈显著正相关;利用隶属函数法对5个金银花品种抗旱性进行综合评价发现平邑山花子金银花、红色金银花和北花1号金银花抗旱性较强。本研究主要研究不同干旱胁迫梯度下5个金银花品种幼苗叶片生理生化特征,后续研究应考虑干旱胁迫对5个金银花品种幼苗生长特征和金银花产量的影响,以及宁夏中卫市压砂地种植5个金银花品种植株的存活情况、生长以及生理特征等,以为宁夏压砂地种质资源多样化提供理论基础^[36]。

4 结 论

干旱胁迫对5个金银花品种幼苗叶片抗氧化酶活性、MDA含量以及渗透调节物质含量均有显著影

响,抗氧化酶活性、MDA含量与脯氨酸含量均随干旱胁迫增加呈升高趋势,可溶性蛋白变化趋势不一致。隶属函数综合分析得出,5个品种金银花抗旱能力由大到小为平邑山花子金银花、红色金银花、北花1号金银花、四季金银花、九丰1号金银花。因此,平邑山花子金银花、红色金银花和北花1号金银花可以作为宁夏中卫市压砂地金银花优选品种重点考虑。

参考文献

- [1] Berauer B J, Steppuhn A, Schweiger A H. The multi-dimensionality of plant drought stress: the relative importance of edaphic and atmospheric drought [J]. *Plant Cell Environ*, 2024, 47(9): 3528-3540.
- [2] Kuromori T, Fujita M, Takahashi F, et al. Inter-tissue and inter-organ signaling in drought stress response and phenotyping of drought tolerance [J]. *The Plant Journal*, 2022, 109(2): 342-358.
- [3] 张斌, 李从娟, 易光平, 等. 梭梭和头状沙拐枣形态及生理生化特性对干旱胁迫的响应[J]. *干旱区研究*, 2024, 41(7): 1177-1184.
Zhang B, Li C J, Yi G P, et al. Physiological, biochemical and morphological responses of *Haloxyylon ammodendron* and *Calligonum caput-medusae* to drought stress [J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(7): 1177-1184.
- [4] 宋艳艳, 徐培月, 何功秀, 等. 外源多效唑对干旱胁迫下闽楠幼苗抗旱性的影响[J]. *应用生态学报*, 2024, 35(10): 2667-2676.
Song Y Y, Xu P Y, He G X, et al. Effect of exogenous paclobutrazol on the drought resistance of *Phoebe bournei* seedlings under drought stress [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2024, 35(10): 2667-2676.
- [5] 金思雨, 彭祚登, 张舒乐. 不同程度干旱胁迫和复水处理对刺槐苗木生理指标的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2024, 52(10): 27-39.
Jin S Y, Peng Z D, Zhang S L. The impact of varying degrees of drought stress and rehydration treatment on the physiological indicators of *Robinia pseudoacacia* seedlings [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2024, 52(10): 27-39.
- [6] 胡焕琼, 李利, 于军, 等. 四翅滨藜和多枝怪柳对土壤干旱的响应差异[J]. *干旱区研究*, 2023, 40(12): 2007-2015.
Hu H Q, Li L, Yu J, et al. Differences in the response to soil drought in *Atriplex canescens* and *Tamarix ramosissima* [J]. *Arid Zone Research*, 2023, 40(12): 2007-2015.
- [7] 徐培培, 曹轶辰, 周涛, 等. 各种属性森林对干旱胁迫的响应研究进展[J]. *生态学报*, 2024, 44(13): 5435-5443.
Xu P P, Cao Y C, Zhou T, et al. Research progress and prospect on the response of forest with different attributes to drought [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(13): 5435-5443.
- [8] Sarker U, Oba S. Drought stress effects on growth, ROS markers, compatible solutes, phenolics, flavonoids, and antioxidant activity in *Amaranthus tricolor* [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2018, 186(4): 999-1016.
- [9] Wahab A, Abdi G, Saleem M H, et al. Plants' physio-biochemical and phyto-hormonal responses to alleviate the adverse effects of drought stress: a comprehensive review [J]. *Plants*, 2022, 11(13): 1620.
- [10] Dola D B, Mannan M A, Sarker U, et al. Nano-iron oxide accelerates growth, yield, and quality of *Glycine max* seed in water deficits [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 992535.
- [11] 席璐璐, 缙倩倩, 王国华, 等. 荒漠绿洲过渡带一年生草本植物对干旱胁迫的响应[J]. *生态学报*, 2021, 41(13): 5425-5434.
Xi L L, Gou Q Q, Wang G H, et al. The responses of typical annual herbaceous plants to drought stress in a desert-oasis ecotone [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(13): 5425-5434.
- [12] 刘洋, 王娟, 白婷玉, 等. 4种园林植物幼苗对干旱胁迫的生长和生理响应[J]. *干旱区资源与环境*, 2021, 35(4): 173-179.
Liu Y, Wang J, Bai T Y, et al. Growth and physiological responses of seedlings of four garden plants to drought stress [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, 35(4): 173-179.
- [13] 李倩, 陈燕, 窦霞, 等. 金银花、山银花、川银花化学成分及药理作用研究进展[J]. *中国民族民间医药*, 2023, 32(15): 67-72.
Li Q, Chen Y, Dou X, et al. Advances in studies on chemical constituents and pharmacological effects of *Lonicerae Japonicae Flos*, *Lonicerae Similis Flos* and *Lonicerae Flos* [J]. *Chinese Journal of Ethnopharmacology and Ethnopharmacy*, 2023, 32(15): 67-72.
- [14] 黄文静, 熊乐文, 张龙霏, 等. 不同种质金银花发育过程中黄酮类成分含量变化规律研究[J]. *中草药*, 2022, 53(10): 3156-3164.
Huang W J, Xiong L W, Zhang L F, et al. Study on content variation of flavonoids in different germplasm during development of *Lonicerae Japonicae Flos* [J].

- Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2022, 53(10): 3156-3164.
- [15] 韦晶玥, 罗诗雯, 冯龄燃, 等. 金银花与山银花活性成分抗炎作用及机制研究进展[J]. 中国实验方剂学杂志, 2024, 30(11): 273-281.
- Wei J Y, Luo S W, Feng L R, et al. Anti-inflammatory effect and mechanism of active constituents from *Lonicerae Japonicae* Flos and *Lonicerae Flos*: a review [J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2024, 30(11): 273-281.
- [16] 石磊, 杨晓慧, 王朝武. 沙坡头区金银花产业发展现状及展望[J]. 河北农机, 2024(7): 76-78.
- Shi L, Yang X H, Wang C W. Development status and prospect of honeysuckle industry in Shapotou district [J]. Hebei Agricultural Machinery, 2024 (7): 76-78.
- [17] 贾振江, 刘学智, 李王成, 等. 旱区连作砂田土壤质量和土地生产力演变与调控研究进展[J]. 生态学报, 2024, 44(5): 2136-2148.
- Jia Z J, Liu X Z, Li W C, et al. Evolution and regulation of soil quality and land productivity in continuous cropping gravel-sand mulched field in arid region: progress and perspective [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(5): 2136-2148.
- [18] 刘平, 岳自慧, 王文, 等. 宁夏压砂地水土流失风险及防治对策[J]. 中国水土保持, 2022(2): 21-22.
- Liu P, Yue Z H, Wang W, et al. Risk of soil and water loss in sand-pressing land of Ningxia and its control countermeasures [J]. Soil and Water Conservation in China, 2022(2): 21-22.
- [19] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社.
- Li H S. Principle and technology of plant physiological and biochemical experiment [M]. Beijing: Higher Education Press.
- [20] 李刚, 王博涵, 张学智, 等. 高温干旱跨代效应对小麦芽期耐旱性和耐盐性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(2): 163-176.
- Li G, Wang B H, Zhang X Z, et al. Effects of high temperature and drought intergenerational effects on drought and salt tolerance of wheat at germination stage [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42 (2): 163-176.
- [21] Basu S, Ramegowda V, Kumar A, et al. Plant adaptation to drought stress [J]. F1000Research, 2016, 5: 1554.
- [22] Sharma A, Zheng B S. Melatonin mediated regulation of drought stress: physiological and molecular aspects [J]. Plants, 2019, 8(7): 190.
- [23] 汪媛艳, 柴成武, 纪永福, 等. 干旱胁迫对荒漠植物梭梭(*Haloxylon ammodendron*)幼苗保护酶活性和渗透调节物质的影响[J]. 草业科学, 2024, 1-11.
- Wang Y Y, Chai C W, Ji Y F, et al. Effects of drought stress on protective enzyme activity and osmotic regulatory substances in desert plant *Haloxylon ammodendron* seedlings [J]. Pratacultural Science, 2024, 1-11.
- [24] 王曦, 胡红玲, 胡庭兴, 等. 干旱胁迫对桉楠幼树渗透调节与活性氧代谢的影响及施氮的缓解效应[J]. 植物生态学报, 2018, 42(2): 240-251.
- Wang X, Hu H L, Hu T X, et al. Effects of drought stress on the osmotic adjustment and active oxygen metabolism of *Phoebe zhennan* seedlings and its alleviation by nitrogen application [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, 42(2): 240-251.
- [25] 韩志顺, 郑敏娜, 梁秀芝, 等. 干旱胁迫对不同紫花苜蓿品种形态特征和生理特性的影响[J]. 中国草地学报, 2020, 42(3): 37-43.
- Han Z S, Zhen M N, Liang X Z, et al. Effects of drought stress on morphological and physiological characteristics of different alfalfa cultivars [J]. Chinese Journal of Grassland, 2020, 42(3): 37-43.
- [26] Du G H, Zhang H X, Yang Y, et al. Effects of gibberellin pre-treatment on seed germination and seedling physiology characteristics in industrial hemp under drought stress condition [J]. Life, 2022, 12(11): 1907.
- [27] 王志超, 何之龙, 陈永忠, 等. 油茶‘湘林210’抗干旱特性研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2024, 44(1): 37-48.
- Wang Z C, He Z L, Chen Y Z, et al. Study on drought resistance characteristics of 'Xianglin 210' *Camellia oleifera* [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2024, 44(1): 37-48.
- [28] 陈德朝, 邹玉和, 鄢武先, 等. 干旱胁迫对治沙植物形态结构和生理特征的影响[J]. 四川林业科技, 2018, 39(6): 81-85.
- Chen D C, Zou Y H, Yan W X, et al. Effects of drought stress on ecological structure and physiological characteristics of sand-control plants [J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2018, 39(6): 81-85.
- [29] Zhou Q, Li Y P, Wang X J, et al. Effects of different drought degrees on physiological characteristics and endogenous hormones of soybean [J]. Plants, 2022, 11 (17): 2282.
- [30] 方静, 史功赋, 魏淑丽, 等. 干旱胁迫对春小麦旗叶生理特征及其根系抗旱基因表达特征的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(3): 46-55.

- Fang J, Shi G F, Wei S L, et al. Effects of drought stress on physiological characteristics of flag leaves and expression characteristics of drought-resistant genes in roots of spring wheat [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(3): 46-55.
- [31] 毛晓佩, 孙永玉, 戚建华, 等. 干旱胁迫下不同地理种源高山栲幼苗生理生化响应[J]. *林业与生态科学*, 2022, 37(3): 258-265.
- Mao X P, Sun Y Y, Qi J H, et al. Physiological and biochemical response of different provenances *Castanopsis delavayis* seedlings under drought stress [J]. *Forestry and Ecological Sciences*, 2022, 37(3): 258-265.
- [32] Reza Yousefi A, Rashidi S, Moradi P, et al. Germination and seedling growth responses of *Zygophyllum fabago*, *Salsola kali* L. and *Atriplex canescens* to PEG-induced drought stress [J]. *Environments*, 2020, 7(12): 107.
- [33] Niu J, Zhang S P, Liu S D, et al. The compensation effects of physiology and yield in cotton after drought stress [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2018, 224/225: 30-48.
- [34] 朱丽丽, 张发玉, 安宁, 等. 116 份藜麦种质资源萌发期抗旱性综合评价[J]. *干旱地区农业研究*, 2024, 42(1): 23-31.
- Zhu L L, Zhang F Y, An N, et al. Comprehensive evaluation of drought resistance of 116 quinoa germplasm resources during germination [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2024, 42(1): 23-31.
- [35] 刘文瑜, 杨发荣, 谢志军, 等. 不同品种藜麦幼苗对干旱胁迫的生理响应及耐旱性评价[J]. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(6): 10-18.
- Liu W Y, Yang F R, Xie Z J, et al. Evaluation of drought tolerance and physiological response to drought stress of different varieties of quinoa seedlings [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(6): 10-18.
- [36] 万河妨, 王硕, 刘波, 等. 干旱地区板蓝根优质种质筛选[J]. *生物资源*, 2023, 45(3): 243-249.
- Wan H F, Wang S, Liu B, et al. Screening of high-quality germplasms of *Isatis indigotica* Fort. in arid areas [J]. *Biotic Resources*, 2023, 45(3): 243-249.

□

(编辑: 杨晓翠)