

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2024.10.007

范伟, 孔秋月, 胡杰, 等. 适宜高钙环境的桑种质资源筛选 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2024, 46(10): 90-98.

适宜高钙环境的桑种质资源筛选

范伟^{1,2}, 孔秋月¹, 胡杰¹, 刘洋¹, 赵爱春^{1,2}

1. 西南大学 资源昆虫高效养殖与利用全国重点实验室/蚕学与系统生物学研究所, 重庆 400715;

2. 国家林业和草原局 重庆黔江荒漠生态系统定位观测研究站, 重庆 黔江 409099

摘要: 桑树是一种兼具经济效益和生态效益的树种, 适宜在石漠化地区推广种植。高钙是石漠化地区土壤的重要特征之一, 也是限制植物生长发育的主要因素之一。因此, 了解我国大面积栽植的不同杂交桑品种的高钙耐受性, 并筛选耐高钙胁迫的品种具有重要意义。以 7 个杂交桑品种幼苗为材料, 研究不同桑树品种在高钙胁迫下的生理生化响应, 并通过隶属函数法综合评价各品种的耐钙胁迫特性。结果表明: 不同桑树品种在高钙胁迫下生长受到显著抑制, 脯氨酸质量分数显著上升, 而品种间抗氧化酶响应胁迫的模式存在差异。基于隶属函数值, 聚类分析发现丰驰和桂桑优 62 为强高钙耐受品种, 粤桑 11 和桂桑优 12 为中等高钙耐受品种, 塘 10×伦 109、桂桑 6 和桂桑优 2 为高钙敏感品种。

关键词: 桑树; 石漠化; 高钙胁迫; 品种筛选; 隶属函数

中图分类号: S888.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2024)10-0090-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Screening of Mulberry Germplasm Resources

Suitable for High Calcium Environment

FAN Wei^{1,2}, KONG Qiuyue¹, HU Jie¹,LIU Yang¹, ZHAO Aichun^{1,2}

1. State Key Laboratory of Resource Insects, Institute of Sericulture and Systems Biology, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Chongqing Qianjiang Desert Ecosystem Positioning Observation and Research Station, National Forestry and Grassland Administration, Qianjiang Chongqing 409099, China

收稿日期: 2023-03-23

基金项目: 国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-18-ZJ0201); 重庆科技兴林项目(渝林科研 2020-2)。

作者简介: 范伟, 博士, 主要从事桑树非生物胁迫机制研究。

通信作者: 赵爱春, 博士, 研究员。

Abstract: Mulberry (*Morus* spp.) is a tree species with both economic and ecological benefits, which is suitable for planting in rocky desertification areas. High calcium concentration (HCC) is one of the important characteristics of the soil in these areas, also one of the main factors limiting the plant growth and development. Therefore, it is of great significance to understand the HCC tolerance of different hybrid mulberry varieties widely planted in China, and to select the varieties with HCC tolerance. In this paper, the seedlings of seven varieties were used as materials to study the physiological and biochemical responses of different mulberry varieties under HCC stress. Then, the HCC tolerance of each variety was comprehensively evaluated by the membership function method. The results showed that the growth of these varieties was significantly inhibited, and the content of proline was significantly increased under HCC stress. The response patterns of antioxidant enzymes to HCC stress were different among varieties. Cluster analysis based on membership function values showed that Fengchi and Guisangyou 62 were highly tolerant to HCC, Yuesang 11 and Guisangyou 12 were moderately tolerant to HCC, and Tang 10×Lun 109, Guisang 6 and Guisangyou 2 were sensitive to HCC.

Key words: mulberry; stony desertification; high calcium concentration stress; variety screening; membership function values

岩溶石漠化是指在喀斯特脆弱生态环境条件下, 由自然或人为因素而导致的地表植被破坏、土壤极度侵蚀、基岩大面积裸露和土壤生产力急剧下降的过程^[1]. 据《中国·岩溶地区石漠化状况公报》显示, 截至 2016 年底, 中国岩溶石漠化面积达 1 007 万 hm^2 , 涉及贵州、云南、广西、湖南、湖北、重庆、四川和广东 8 省(区、市)463 个县, 占区域国土面积的 9.4%. 石漠化的危害主要表现为土地退化, 植被种类减少并逆向演替, 植被涵养水源、截蓄降水和调节径流的功能下降, 导致地区干旱、洪涝等自然灾害频发, 耕地资源减少, 农民贫困加重等^[2]. 因此, 石漠化是中国西南亚热带喀斯特地区面临的重大生态问题之一, 严重制约当地经济的可持续发展^[3]. 从 20 世纪 80 年代开始, 我国先后开展了许多石漠化修复项目, 其中最重要的措施之一是在当地发展生态农业, 既有利于恢复植被, 也能增加当地居民的经济收入^[4].

桑树作为一种多年生的速生乔木, 发达的根系、强大的保水固土和耐修剪等特点赋予其极强的生命力和抗逆特性, 使其在防风固沙、石漠化治理、水土保持、盐碱地治理、城市绿化、消落带生态恢复、重金属污染土壤生态修复等方面均有广泛的利用价值^[5-6]. 除了作为家蚕唯一的天然饲料来源外, 桑树的多元化利用也方兴未艾. 桑叶为“药食同源”植物, 桑叶中的蛋白质、碳水化合物、无机盐和和维生素质量分数高, 适合食用, 可以制茶和桑叶面^[7]. 桑叶干物质中粗蛋白质量分数达 15%~30%, 可以作为饲料原料喂养猪、鸡、鱼等^[8]. 桑枝、桑白皮、桑椹富含黄酮、生物碱、多糖类化合物, 是传统的中药材^[9]. 同时, 桑枝也是食用菌培养基、纸张和人工纤维的原材料. 桑椹味甜汁多, 可作为水果, 也可加工成果汁和果酒等产品. 随着 2006 年“东桑西移”国家战略的实施, 中国栽桑养蚕的重心逐步从东部地区向西部地区转移. 据 2020 年全国桑园面积统计结果显示, 西部地区桑园面积为 54.76 万 hm^2 , 占比为 71.6%, 其中广西、四川、云南位居前 3, 桑园面积均超过 6.67 万 hm^2 . 而石漠化涉及的 8 个省(自治区、直辖市)的桑园面积合计占全国桑园总面积的 71.3%, 蚕茧产量占全国蚕茧总产量的 83.3%. 因此, 蚕桑产业在中国石漠化地区的生态修复和经济发展中具有巨大的潜力.

石漠化地区土壤主要由碳酸盐岩石(CaCO_3 , MgCO_3)组成, 其特征主要为土壤高钙、持水能力差、干旱频发等^[10]. 土壤高钙是影响石漠化地区植被类型、植物生理特征和分布最重要的环境因素之一^[11-12], 当

土壤中 Ca^{2+} 过高时, 会损害植物细胞壁和细胞膜, 干扰植物磷酸代谢系统, 抑制光合作用和蒸腾速率^[13]. 由于桑树分布地域广、生长环境多样、受自然和人工选择时间长等特点, 造就了其丰富的种质资源. 然而, 目前对于不同桑树或桑树砧木种质以及品种资源在高钙环境下的生理生化分析和特性评价未见报道. 本研究选取 7 个在中国亚热带广泛种植和在良桑扩繁中作为砧木广泛使用的桑品种为试验材料, 完成了钙处理浓度的筛选和桑苗根长、叶绿素质量分数、抗氧化酶活性、脯氨酸质量分数等生理指标的测定与分析, 以及不同品种桑苗抗高钙胁迫能力的综合评价, 以期有助于揭示桑树在响应高钙胁迫时的生理现象, 也为获得适合在石漠化地区直接推广桑树品种和良桑繁育的砧木奠定基础.

1 材料与方法

1.1 供试材料

本研究使用 7 个杂交桑品种的种子, 包括桂特优 2(*M. atropurpurea* cv. Guiteyou2, G2), 桂桑 6(*M. atropurpurea* cv. Guisang6, G6), 桂桑优 12(*M. atropurpurea* cv. Guisangyou12, G12), 桂桑优 62(*M. atropurpurea* cv. Guisangyou62, G62), 粤桑 11(*M. atropurpurea* cv. Yuesang11, Y11), 塘 10×伦 109 (*M. atropurpurea* cv. Tang10×Lun109, TL), 丰驰(*M. alba* cv. Fengchi, FC). 这 7 个品种在全国范围内被推广种植, 同时也是其他桑树品种嫁接繁殖的常用砧木品种. 各品种的种子经消毒后, 置于 MS 固体培养基上, 萌发至 10 d 苗龄大小, 选取大小一致的幼苗进行后续试验.

1.2 钙胁迫处理

选取 10 d 苗龄大小的 G12, G62 和 FC 无菌苗筛选合适的钙处理浓度. 将苗置于含 0(对照), 50, 100, 150, 200 mmol/L CaCl_2 的 MS 固体培养基上. 将固体平板竖直放置在培养箱中, 培养条件为 23 ℃ 下光照 16 h/黑暗 8 h. 主根长通过 WinRHIZO 根系分析系统观测. 随后将 10 d 苗龄大小的 7 个品种无菌苗分别置于含 0(对照)和 100 mmol/L CaCl_2 的 MS 固体培养基上. 14 d 后测定主根长, 并收集新鲜植物体进行后续指标的测定.

1.3 叶绿素质量分数测定

称取叶片 0.1 g, 用剪刀尽量剪碎, 10 mL 80%丙酮浸提 12 h, 期间摇动 2~3 次至样品完全变白, 然后离心除去残渣; 再用 80%丙酮定容至 25 mL, 即得到叶绿素提取液. 用酶标仪分别在 646, 663 nm 处进行吸光度的测量. 叶绿素质量分数的计算公式为:

$$S_{\text{Chla}} = 12.21 \times OD_{663} - 2.81 \times OD_{646} \tag{1}$$

$$S_{\text{Chlb}} = 20.13 \times OD_{646} - 5.03 \times OD_{663} \tag{2}$$

$$S_{\text{Chl}} = \frac{(S_{\text{Chla}} + S_{\text{Chlb}}) \times V}{f_w} \tag{3}$$

S_{Chla} 为叶绿素 a 质量浓度(mg/L), S_{Chlb} 为叶绿素 b 质量浓度(mg/L), S_{Chl} 为叶绿素质量分数(mg/g), V 为提取液体积(L), f_w 为组织湿质量(g).

1.4 抗氧化酶活力、丙二醛(MDA)和脯氨酸(Pro)测定

以研磨后的植株为样品, 参照 BCA 蛋白浓度测定试剂盒(碧云天, TJD20S)说明书, 制作标准曲线, 检测并计算样品中总蛋白浓度. 参考茚三酮法脯氨酸(Pro)质量分数测试盒(南京建成, A107-1-1)说明书, 检测并计算样品中 Pro 质量分数. 参考钼酸铵法过氧化氢酶(CAT)测定试剂盒(南京建成, A007-1-1)说明书, 检测并计算样品中 CAT 活性. 参考黄嘌呤氧化酶法(羟胺法)总超氧化物歧化酶(T-SOD)测试盒(南京建成, A001-1-1)说明书, 检测并计算样品中 SOD 活性. 参考过氧化物酶(POD)测定试剂盒(南京建成, A084-3-1)说明书, 检测并计算样品中 POD 活性.

1.5 钙耐受综合评价

采用模糊数学的隶属函数法分析评价 7 个桑树品种幼苗的高钙耐受性^[14]. 隶属函数值(Membership Function Value, MFV)基于钙耐受系数(Calcium Tolerance Coefficients, CTC)计算. CTC 的计算公式为

$$CTC = \frac{CT}{CK} \times 100 \tag{4}$$

CK 为对照组某一指标的平均值, CT 为处理组对应指标的平均值, CCT 包括各形态、生理生化指标. 钙耐受性的 MFV 计算公式为:

$$MFV1_{CTCi} = \frac{CTCi - CTC_{min}}{CTC_{max} - CTC_{min}} \tag{5}$$

$$MFV2_{CTCi} = 1 - \frac{CTCi - CTC_{min}}{CTC_{max} - CTC_{min}} \tag{6}$$

与钙耐受性正相关的指标用公式 MFV1 计算, 与钙耐受性负相关的指标用公式 MFV2 计算. CTC_i 表示第 i 个指标, CTC_{max} 为第 i 个指标的 7 个品种中最大的 CTC 值, CTC_{min} 为第 i 个指标的 7 个品种中最小的 CTC 值.

为了对 7 个桑树品种的钙耐受性进行排序, 计算各品种的 MFV 平均值. 同时, 基于每个品种各指标的 MFV 进行聚类分析, 采用欧式距离(Euclidean Distance)进行计算.

1.6 统计分析

本研究数据中, 各形态、生理生化指标结果用平均值±标准差表示, 使用 SPSS 20.0 进行统计分析, 使用 GraphPad Prism 7.0 作图. 两组间比较, 使用独立样品 T-test 分析, * 代表 $p < 0.05$, * * 代表 $p < 0.01$, 差异有统计学意义.

2 结果与分析

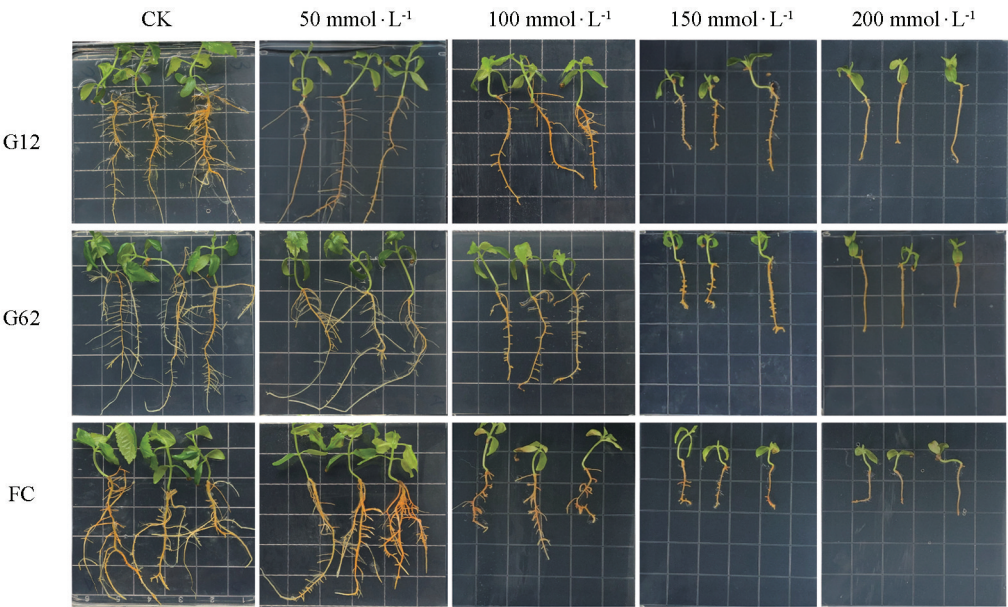
2.1 不同 Ca²⁺ 浓度对桑树幼苗生长的影响

为了筛选到适用于桑树幼苗的钙处理浓度, 选取 10 d 大小的桑树品种桂桑优 12(G12)、桂桑优 62(G62)和丰驰(FC)幼苗作为试验材料, 置于含不同 CaCl₂ 浓度的 MS 培养基中, 14 d 后测量其主根生长量(图 1). 与对照组相比, 在 50 mmol/L Ca²⁺ 浓度条件下, 3 个品种的桑树幼苗表型和主根伸长量无显著变化, 主根平均伸长量为对照组的 86.6%(G12), 80.2%(G62), 80.2%(FC); 在 100 mmol/L Ca²⁺ 浓度条件下, 3 个品种的桑树幼苗主根生长受到显著抑制, 叶片有失绿、焦枯的现象, 主根平均伸长量为对照组的 24.3%(G12), 16.6%(G62), 20.0%(FC); 在 150 mmol/L 和 200 mmol/L Ca²⁺ 浓度条件下, 3 个品种的桑树幼苗表现为严重的生长不良, 植株整体生长缓慢, 小而卷曲, 脆弱易折, 主根的生长受到严重抑制, 几乎停止发育.

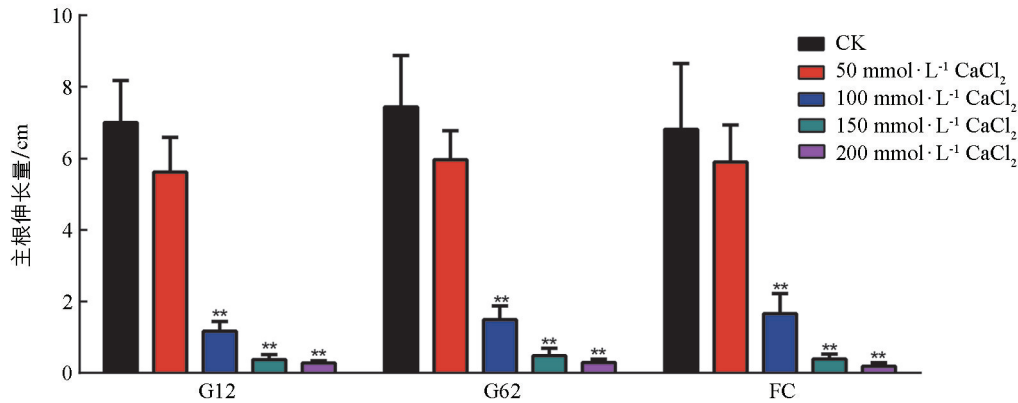
在本试验选取的 4 个 Ca²⁺ 胁迫浓度中, 与其他处理浓度相比, 100 mmol/L Ca²⁺ 浓度下的桑树幼苗表型与对照组差异显著, 表明受到了比较严重的钙离子胁迫, 但植株整体生长状态尚可, 因此选定 100 mmol/L 为后续耐高钙品种筛选的钙胁迫处理浓度.

2.2 高钙胁迫对不同桑树品种幼苗生长的影响

为了研究 7 个桑树品种对高钙胁迫的生理生化反应, 以 100 mmol/L Ca²⁺ 为处理浓度对这些品种的 10 d 大小幼苗进行胁迫处理, 14 d 后测定主根伸长量、叶绿素质量分数、脯氨酸(Pro)质量分数和抗氧化酶活性等生理生化指标(图 2). 同对照组相比, 100 mmol/L Ca²⁺ 浓度处理下, 7 个桑树品种的幼苗主根伸长量和叶片叶绿素质量分数均受到显著抑制(图 2a, 2b). 在幼苗主根伸长量指标上, 粤桑 11(Y11)受



a. 不同浓度钙胁迫下桑苗表型图



b. 不同浓度钙胁迫下桑苗主根生长量

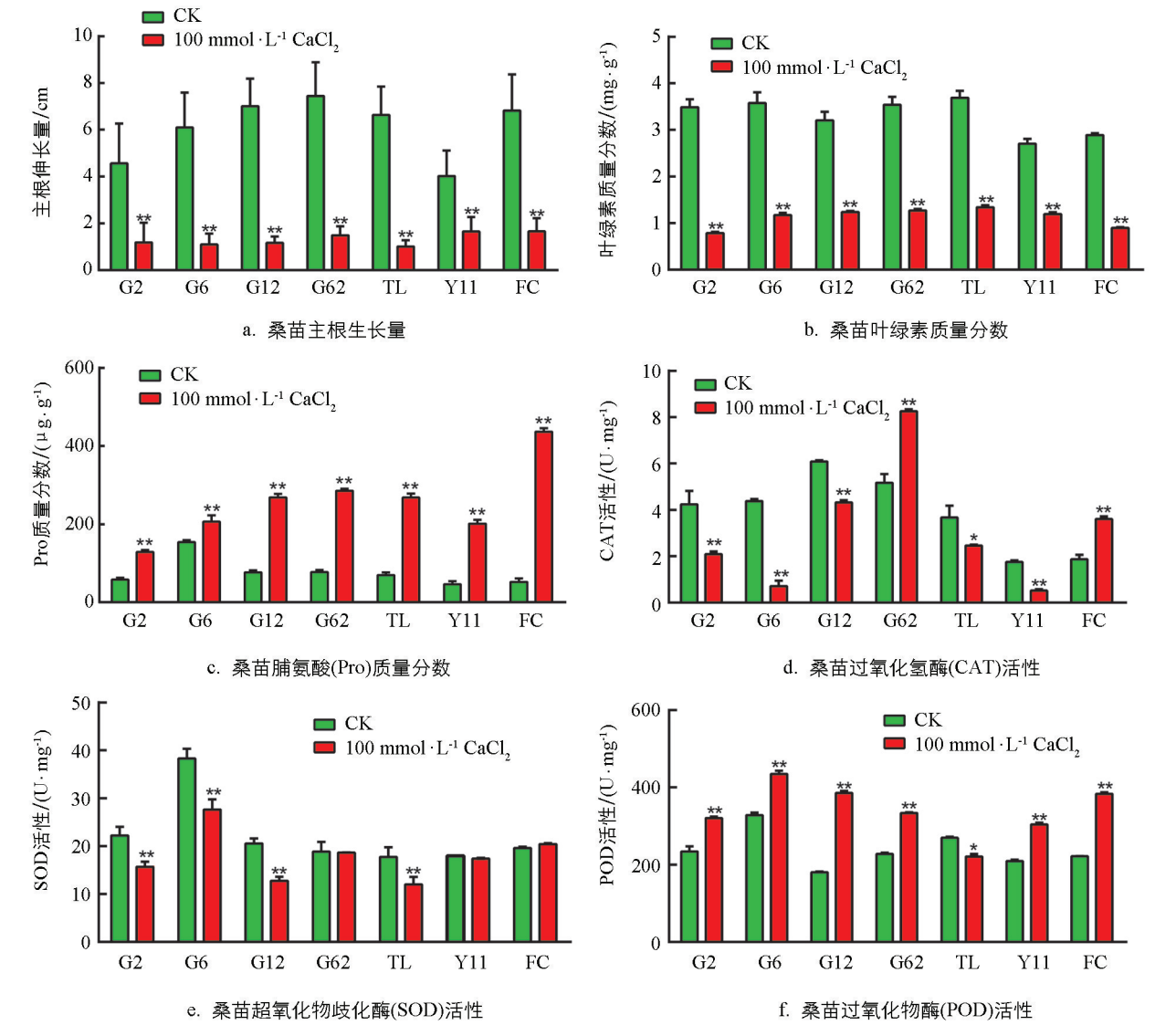
G12: 桂桑优 12, G62: 桂桑优 62, FC: 丰驰. 对照组与处理组比较, * 代表 $p<0.05$, ** 代表 $p<0.01$, 差异有统计学意义.

图 1 不同浓度钙浓度处理下的桑树幼苗生长情况

到的抑制效果最轻,主根的相对伸长量为 41.1%;塘 10×伦 109(TL)受到的抑制效果最显著,主根的相对伸长量为 15.3%(表 1). 在幼苗叶片叶绿素质量分数指标上,Y11 受到的抑制效果最轻,叶绿素的相对质量分数为 44.1%;桂特优 2(G2)受到的抑制效果最显著,叶绿素的相对质量分数为 22.5%(表 1). 同对照相比,100 mmol/L Ca^{2+} 浓度处理下,7 个桑树品种的幼苗植株脯氨酸(Pro)质量分数显著上升(图 2c). 其中,丰驰(FC)的 Pro 质量分数最高(835.7%),而桂桑 6(G6)的 Pro 质量分数最低(133.8%)(表 1).

当植物受到胁迫时,促进细胞内的活性氧基团(ROS)生成,引起植物的氧化应激反应^[15]. 植物通常通过增强一些抗氧化酶活性来减少细胞中过量的 ROS^[16]. 同对照组相比,7 个桑树品种高钙处理下的幼苗过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性存在差异(图 2d-2f). 其中,FC 与 G62 的 CAT 活性显著高于对照组,而其余 5 个品种的 CAT 活性均显著低于对照组. 该结果表明 100 mmol/L Ca^{2+} 可能超出了这 5 个品种的相对耐受阈值,使响应胁迫的 CAT 活性低于正常水平. 桂桑优 62(G62)、粤桑 11(Y11)和丰驰(FC)的 SOD 活性与对照组相比无显著差异,其余 4 个品种的 SOD 活性均显著低于对照组. 该结果表明 100 mmol/L Ca^{2+} 可能超出了这 4 个品种的相对耐受阈值,使响应胁迫的 SOD 活性低于正常水平. 在处理组中,除塘 10×伦 109(TL)的 POD 活性低于对照组外,

其余 6 个品种的 POD 活性均显著高于对照组.



G2: 桂特优 2, G6: 桂桑 6, G12: 桂桑优 12, G62: 桂桑优 62, TL: 塘 10× 伦 109, Y11: 粤桑 11, FC: 丰驰. 对照组与处理组比较, * 代表 $p<0.05$, * * 代表 $p<0.01$, 差异有统计学意义.

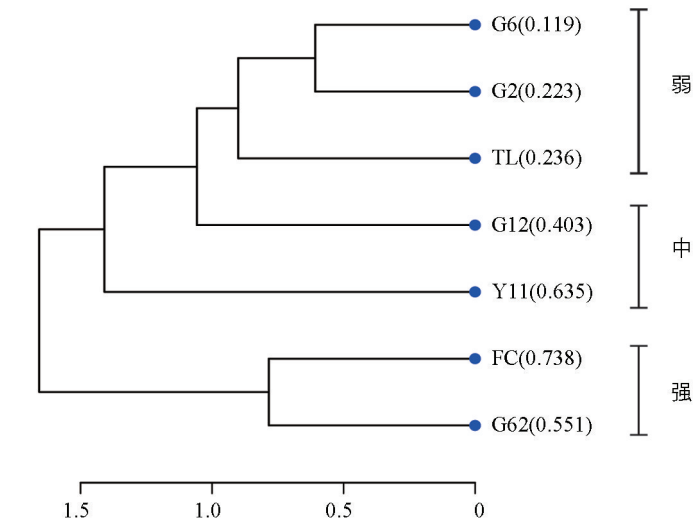
图 2 高钙胁迫下 7 个桑树品种幼苗的生理生化反应

表 1 基于生理生化指标的 7 个品种桑树的钙耐受系数(CTC) %

品种	主根伸长量	叶绿素质量分数	Pro 质量分数	CAT 活性	SOD 活性	POD 活性
G2	25.9	22.5	222.2	49.2	70.7	136.8
G6	18.0	32.7	133.8	16.3	72.1	132.4
G12	16.6	38.6	351.2	71.0	62.2	214.4
G62	20.0	35.9	369.6	159.7	98.8	146.4
TL	15.3	36.2	385.9	67.0	67.9	82.0
Y11	41.1	44.1	436.2	29.5	96.9	145.5
FC	24.3	30.9	835.7	192.8	104.3	173.1

2.3 不同桑树品种幼苗的耐高钙性排序和分组

基于隶属函数值(MFV)的综合评价方法在油菜、玉米、葡萄等不同品种的抗盐、抗旱性评价中有诸多报道^[14, 17-19]。为了系统评价桑树品种间耐高钙性的强弱,采用钙耐受系数(CTC)对所有指标进行标准化分析(表 1),随后利用 CTC 计算桑树品种的 MFV。基于每个品种各项指标的 MFV 均值,对桑树品种的耐高钙能力进行排序。MFV 均值越高,表示推测的耐高钙性越高。7 个品种 MFV 均值由高到低依次为 FC, Y11, G62, G12, TL, G2, G6。其中,FC 的 MFV 均值最高为 0.738,而



基于生理生化指标的隶属函数值 MFV 计算,品种名后括号内的值为该品种各指标的 MFV 平均值。

图 3 7 个桑树品种耐高钙胁迫聚类分析

G6 的 MFV 均值最低为 0.119。在 MFV 计算的基础上,采用欧氏距离法聚类分析对桑树品种进行分类(图 3)。根据聚类结果,FC, G62 聚为一组(高钙耐受较强组),TL, G6 和 G2 聚为一组(高钙耐受较弱组),而 Y11 和 G12 居于中间(高钙耐受中等组)。

3 讨论

钙是植物必需的大量元素之一,在植物生长发育中发挥着重要的生物学作用。而当过量的 Ca^{2+} 进入细胞质中,可与磷酸盐形成沉淀物,导致磷酸代谢途径紊乱,破坏细胞膜结构,降低光合作用和蒸腾速率减缓植物生长^[20]。高钙是石漠化地区土壤的典型特征之一,影响植物群落的类型和分布^[21]。当外源 Ca^{2+} 处理浓度大于 20 mmol/L 时,千穗谷(*Amaranthus hypochondriacus*)幼苗发育不良^[22]。30 mmol/L Ca^{2+} 处理浓度下,拟南芥(*Wassilewskija*)幼苗生长受到严重抑制^[23]。吊石苣苔(*Lysionotus pauciflorus*)和旋蒴苣苔(*Boea hygrometrica*)是中国西南喀斯特地区的当地物种,能够耐受的根际可溶性钙浓度最高阈值分别为 200 mmol/L 和 20 mmol/L^[24]。在本试验中,3 个品种的桑树幼苗在 50 mmol/L Ca^{2+} 条件下均能够正常生长,说明桑树幼苗具有较强的耐高钙性。

本研究选取 100 mmol/L Ca^{2+} (约 4 g/kg)作为品种筛选浓度,略高于已报道的湖南、贵州石漠化地区土壤平均交换性钙质量分数 1.46~3.61 g/kg^[12, 25]。同对照组相比,100 mmol/L Ca^{2+} 处理条件下,7 个桑树品种幼苗的主根伸长量和叶片叶绿素质量分数均显著下降,而 Pro 质量分数均显著上升。Pro 作为一种渗透调节物质,具有清除活性氧、保护酶活性、调节渗透平衡、提供能量来源等作用,在干旱、盐胁迫等条件下会在植物体内大量积累^[26]。因此,Pro 在植物响应高钙胁迫中也发挥着重要的功能。

SOD, CAT 和 POD 作为植物抗氧化酶系统的重要组成部分,SOD 在细胞内参与将超氧自由基转换为 H_2O_2 ,CAT 和 POD 在细胞内参与清除 H_2O_2 ^[16]。在本试验中,7 个桑树品种间的 CAT, SOD 和 POD 活性在高钙胁迫条件下存在差异,有的同对照组相比活性下降,有的同对照组相比活性上升。据报道,50 mmol/L Ca^{2+} 处理 60 d 条件下会导致金银花根系活力下降,叶片 MDA 质量分数和 SOD, CAT 和 POD 活性上升^[27]。彭博等^[28]报道了狭叶香蒲在不同钙浓度梯度下 30 d 后的生长状况和生理特性,同对

照组相比, 0.9~1.5 g/kg 钙处理组中 SOD 活性显著上升, 而 1.8 g/kg 钙处理组中 SOD 活性显著降低^[28]. 100 mmol/L Ca²⁺ 浓度下, G62, Y11 和 FC 的 SOD 活性与对照组相比无显著差异, 其余 4 个品种的 SOD 活性均显著低于对照组; 而 CAT 和 POD 活性方面, 仅 FC 与 G62 的 CAT 活性显著高于对照组, 除 TL 外, 其余 6 个品种的 POD 活性均显著高于对照组. 综合相关报道, 说明当胁迫达到一定阈值时, 一些抗氧化酶活性会从促进转为受到抑制. 并且在长时间(14 d)的高钙胁迫后, 抗氧化酶之一的 POD 可能在大多数桑树品种中发挥着重要作用.

除了高钙, 石漠化地区的特征还包括干旱、高温、强光、高 pH 值等^[29], 而桑树耐旱、耐盐碱等特性让其在陕西、新疆等地的水土保持、防风固沙和生态防护中发挥着重要的作用. 通过本试验筛选获得高钙耐受性前三的品种为 FC, G62 和 Y11, 这些品种具有在石漠化地区推广种植的潜力, 可作为该地区桑树苗木繁育的优良砧木候选品种. 今后, 相关研究工作的重点将是在石漠化地区开展上述几个品种的田间试验, 以便进一步研究这些地区桑树的适应性、桑叶产量、土壤改良和水土保持等方面的经济和生态效益. 同时, 开发适用于石漠化地区的桑树高产栽培技术和标准同样非常重要.

参考文献:

[1] 袁道先. 岩溶石漠化问题的全球视野和我国的治理对策与经验 [J]. 草业科学, 2008, 25(9): 19-25.

[2] 王宏远, 韩志敏, 刘子琦. 中国喀斯特地区石漠化成因及其危害研究概述 [J]. 安徽农业科学, 2011, 39(11): 6680-6684.

[3] 陈洪松, 岳跃民, 王克林. 西南喀斯特地区石漠化综合治理: 成效、问题与对策 [J]. 中国岩溶, 2018, 37(1): 37-42.

[4] 伏文兵, 严友进, 李华林, 等. 岩溶槽谷石漠化综合治理区治理生态效益评价 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(7): 146-156.

[5] 蒋勇兵, 颜新培, 黄仁志, 等. 桑树的生态应用前景 [J]. 中国蚕业, 2018, 39(3): 45-51.

[6] 秦俭, 何宁佳, 黄先智, 等. 桑树生态产业与蚕丝业的发展 [J]. 蚕业科学, 2010, 36(6): 984-989.

[7] 郑莎, 曾卫湘, 韩冷, 等. 45 个桑种质和品种资源叶的营养品质综合评价 [J]. 食品科学, 2017, 38(8): 159-163.

[8] 王玉诗, 丁鹏, 李霞, 等. 饲料桑叶的饲用价值及其在畜禽生产中的应用进展 [J]. 畜牧与兽医, 2018, 50(9): 131-136.

[9] 王元成, 徐立. 桑树各入药部位的活性成分及降血糖功能研究进展 [J]. 蚕业科学, 2015, 41(2): 367-375.

[10] 郭柯, 刘长成, 董鸣. 我国西南喀斯特植物生态适应性及石漠化治理 [J]. 植物生态学报, 2011, 35(10): 991-999.

[11] 吴耿. 西南岩溶地区典型植物适应岩溶高钙环境的机制 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.

[12] WEI X C, DENG X W, XIANG W H, et al. Calcium Content and High Calcium Adaptation of Plants in Karst Areas of Southwestern Hunan, China [J]. Biogeosciences, 2018, 15(9): 2991-3002.

[13] 檀龙颜, 马洪娜. 植物响应钙离子胁迫的研究进展 [J]. 植物生理学报, 2017, 53(7): 1150-1158.

[14] MOHAMED I A A, SHALBY N, BAI C Y, et al. Stomatal and Photosynthetic Traits are Associated with Investigating Sodium Chloride Tolerance of *Brassica napus* L. Cultivars [J]. Plants, 2020, 9(1): 62.

[15] HERNÁNDEZ J A, CORPAS F J, GÓMEZ M, et al. Salt-Induced Oxidative Stress Mediated by Activated Oxygen Species in Pea Leaf Mitochondria [J]. Physiologia Plantarum, 1993, 89(1): 103-110.

[16] KUSVURAN S, KIRAN S, ELLIALTIOGLU S S. Antioxidant Enzyme Activities and Abiotic Stress Tolerance Relationship in Vegetable Crops [M]//Abiotic and Biotic Stress in Plants - Recent Advances and Future Perspectives, 2016.

[17] WU H, GUO J R, WANG C F, et al. An Effective Screening Method and a Reliable Screening Trait for Salt Tolerance of Brassica Napus at the Germination Stage [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 530.

[18] 邹成林, 黄开健, 翟瑞宁, 等. 基于隶属函数法和主成分分析评价玉米萌发期抗旱性 [J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(13): 7-13.

[19] 丁守鹏, 张国新, 陈猛, 等. 基于隶属函数法的葡萄耐盐性评价 [J]. *安徽农业科学*, 2021, 49(24): 75-77, 82.

[20] MARSCHNER H. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* [M]. New York: Academic Press, 2011.

[21] LI F, HE X H, SUN Y Y, et al. Distinct Endophytes are Used by Diverse Plants for Adaptation to Karst Regions [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 5246.

[22] AGUILAR-HERNÁNDEZ H S, SANTOS L, LEÓN-GALVÁN F, et al. Identification of Calcium Stress Induced Genes in Amaranth Leaves through Suppression Subtractive Hybridization [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2011, 168(17): 2102-2109.

[23] CHAN C W M, SCHORRAK L M, SMITH R K Jr, et al. A Cyclic Nucleotide-Gated Ion Channel, CNGC2, is Crucial for Plant Development and Adaptation to Calcium Stress [J]. *Plant Physiology*, 2003, 132(2): 728-731.

[24] LI W L, XU F L, CHEN S X, et al. A Comparative Study on Ca Content and Distribution in Two Gesneriaceae Species Reveals Distinctive Mechanisms to Cope with High Rhizospheric Soluble Calcium [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2014, 5: 647.

[25] 姬飞腾, 李楠, 邓馨. 喀斯特地区植物钙含量特征与高钙适应方式分析 [J]. *植物生态学报*, 2009, 33(5): 926-935.

[26] HAYAT S, HAYAT Q, ALYEMENI M N, et al. Role of Proline under Changing Environments [J]. *Plant Signaling & Behavior*, 2012, 7(11): 1456-1466.

[27] 谢元贵, 刘济明, 廖小锋, 等. 钙胁迫对金银花生理生化特性的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(17): 144-146.

[28] 彭博, 徐鸣洲, 王妍, 等. 钙胁迫对狭叶香蒲的生长及逆境生理指标的影响 [J]. *西部林业科学*, 2020, 49(4): 163-170.

[29] 倪隆康, 顾大形, 何文, 等. 岩溶区植物生态适应性研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2019, 38(7): 2210-2217.

责任编辑 苏荣艳