

干旱胁迫对屋顶绿化植物小叶黄杨叶片抗氧化特性的影响^{*}

刘 慧 张崇洋 刘世亮 周孟棕
吴苗苗 姜桂英 刘 芳 赵 颖

(河南农业大学 资源与环境学院, 河南 郑州 450002)

摘要 以 2 年生小叶黄杨 *Buxus microphylla* 叶片为试材, 通过盆栽试验模拟自然干旱条件, 设置正常供水 (田间持水量的 80%~90%)、轻度干旱胁迫 (田间持水量的 60%~70%)、中度干旱胁迫 (田间持水量的 50%~60%) 和重度干旱胁迫 (田间持水量的 35%~45%) 4 个处理, 监测小叶黄杨不同生长时期的叶片相关酶活性, 以期研究干旱胁迫条件下小叶黄杨叶片抗氧化特性的变化特征。研究发现: 随着干旱胁迫程度的增加和时间的延长, 叶片超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 活性均呈升高-降低-升高趋势; 丙二醛 (MDA) 含量呈先下降后上升趋势; 过氧化氢酶 (CAT) 活性和可溶性蛋白质含量均呈先上升后下降趋势。可见, 轻度干旱胁迫 (TB) 会使小叶黄杨叶片抗氧化酶活性增强和可溶性蛋白质含量升高, 但重度干旱胁迫 (TD) 会损害其正常生长。结果表明: 在轻度和中度干旱胁迫后, 通过提高保护酶活性和可溶性蛋白质含量来协调和维持氧化物含量的相对平衡以保证小叶黄杨正常生长发育, 而重度胁迫后, 小叶黄杨保护酶系统和细胞遭受不可逆的损害, 影响其正常生长。

关键词 小叶黄杨; 屋顶绿化; 干旱胁迫; 叶片酶活性; 抗氧化

中图分类号: S181 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-2053 (2022) 03-0086-08

Effects of Drought Stress on Antioxidant Properties of Roof Greening Plant *Buxus microphylla* Leaves

LIU Hui ZHANG Chongyang LIU Shiliang ZHOU Mengliang
WU Miaomiao JIANG Guiying LIU Fang ZHAO Ying

(College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan 450002, China)

Abstract The pot experiment was carried out with taking the leaves of 2-year-old *B. microphylla* as test materials under simulated natural drought conditions. Four treatments of normal water supply (80%-90% field water capacity, CK), mild drought stress (60%-70% field water capacity, TB), moderate drought stress (50% -60% field water capacity, TC) and severe drought stress (35% -45% field water capacity, TD) were set to dynamically monitor the activities of related enzymes in leaves of *B. microphylla* at different growth stages, in order to study the changes characteristics of leaf antioxidant properties of *B. microphylla* which was a roof greening plant under drought stress. The study found that the activities of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) in leaves were increased first, then decreased, and finally increased with drought stress degree and time. The content of malondialdehyde (MDA) in leaves of *B. microphylla* was decreased firstly and then increased. The activity of catalase (CAT) and the content of soluble protein were increased firstly and then

^{*} 第一作者: 刘慧 (1994—), 女, 在读硕士, 研究方向为资源利用与植物保护, E-mail: 3060023924@qq.com。

通信作者: 刘芳 (1973—), 女, 副教授, 主要从事土壤化学与植物营养研究, E-mail: f-liu113@163.com。

赵颖 (1980—), 女, 副教授, 主要从事土壤环境化学研究, E-mail: zhaoyingspring@163.com。

decreased. So the activity of antioxidant enzymes and the content of soluble protein increased under mild drought stress, but the normal growth of *B. microphylla* would be damaged under severe drought stress. The results showed that the relative balance of oxide content was coordinated and maintained by increasing protective enzyme activity and soluble protein content to ensure the normal growth and development of *B. microphylla* after mild and moderate drought stress, while after severe stress, the protective enzyme system and cells of *B. microphylla* suffered irreversible damage and affected their normal growth.

Key words *Buxus microphylla*; roof greening; drought stress; leaf enzyme activity characteristics; antioxidant

伴随着城市化进程的不断加快, 钢筋水泥等建筑日益增多, 绿地面积日渐减少, 导致许多城市的高温、干燥等环境愈加严重。屋顶绿化以其独特的优势, 如集中节约利用城市空间、增加绿地面积、提高生态环境质量等受到更多的关注和快速发展^[1-2]。但这独特的立地条件使植物种植与地面隔离, 缺少地下水补给, 且光照强烈、夏天高温、高风速、水分挥发较快, 对植物抗旱性要求非常高^[3]。

小叶黄杨 *Buxus microphylla* 属黄杨科黄杨属植物, 常绿灌木或小乔木, 枝叶茂密、常青, 有研究表明小叶黄杨具备较强的耐旱性^[4]。近年来, 有关干旱胁迫对小叶黄杨幼苗生理特性的影响主要在小叶黄杨的耗水规律和光合作用变化特征^[5]、水分利用效率^[6]等方面进行了研究。对干旱胁迫下小叶黄杨保护酶活性、膜脂过氧化及渗透调节等方面研究较少。干旱胁迫往往会导致植物体内活性氧 (ROS) 累积, 进而对植物造成氧化胁迫。为保护机体免受损害, 植物进化出了抗氧化系统以有效清除 ROS, 因此, 植物叶片的抗氧化酶是植物抗逆性生理评价的重要指标。在自然选择和遗传变异的双重作用下, 植物对干旱胁迫的抗性逐渐形成, 这种抗逆性与植物的生理状态和内部结构密切相关^[7]。因此, 研究不同干旱胁迫下小叶黄杨抗氧化酶活性和渗透调节物质含量的变化, 对了解小叶黄杨适应干旱机制具有重要意义。本文通过对小叶黄杨在不同干旱胁迫条件下叶片抗氧化特性的变化特征进行了研究, 以期小叶黄杨屋顶环境种植提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

在河南省郑州市金水区硅谷广场楼顶 (E113°40'~113°47', N34°50'~34°57') 进行试验,

该区属于温带季风气候, 年平均气温 14.8 ℃, 降雨量 586.1 mm, 其中郑州市 6—8 月降雨量达到 322 mm, 8 月平均气温 25.9 ℃, 屋顶温度最高可达 50~55 ℃。

1.2 试验材料

供试小叶黄杨为两年苗龄, 由郑州市陈寨花卉市场购得。

供试土壤采自郑州市郊农田土壤 (0~20 cm), 属典型褐土, 基本理化性质如下: pH 7.79, EC 值 0.11 ms·cm⁻¹, 有机质含量 7.77 g·kg⁻¹, 碱解氮、有效磷、速效钾含量 44.97 mg·kg⁻¹, 7.44 mg·kg⁻¹, 62.16 mg·kg⁻¹, 田间持水量 32.65%。

1.3 试验方法

于 2019 年 6—9 月进行试验, 选用高 30 cm 直径 40 cm 的塑料盆, 每盆装土 12.50 kg, 移栽前施用 2.50 kg 的商品有机肥 (有机质 ≥ 45%, N+P₂O₅+K₂O ≥ 6%)。

试验共设 4 个土壤水分处理: 正常水分处理, 田间持水量的 80%~90% (CK); 轻度干旱胁迫, 田间持水量的 60%~70% (TB); 中度干旱胁迫, 田间持水量的 50%~60% (TC); 重度干旱胁迫, 田间持水量的 35%~45% (TD)。每个处理设 3 次重复 (即每个处理种植 3 盆), 每盆种植 1 株小叶黄杨, 进行正常栽培管理, 采用称量法控制土壤含水量。

盆栽置于塑料大棚下, 每天 18:00 时称重补充水分。在移栽后 0、20、40、60、80 d, 采集由顶端往下第 6~8 片完全伸展叶, 采集后迅速用液氮冷冻, 置于 -80 ℃ 冰箱保存, 用于相关指标测定。

1.4 项目测定

土壤 pH、EC 采用多参数分析仪 (沪制 02220142) 测定; 有机质含量采用重铬酸钾容量法—外加热法测定; 碱解氮含量采用碱解扩散法测定; 速效磷含量采用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸

提—钼锑抗比色法测定；速效钾含量采用火焰光度法测定^[8]。

叶片过氧化氢酶（CAT）活性采用紫外分光光度法测定^[9]；丙二醛（MDA）含量采用硫代巴比妥酸法测定^[10]；超氧化物歧化酶（SOD）和过氧化物酶（POD）活性采用南京建成公司生产的SOD试剂盒和POD试剂盒测定^[11]；可溶性蛋白质含量采用考马斯亮蓝 G-250 法测定^[9]。

1.5 数据分析

试验数据为3次重复的平均值，使用WPS 2016软件整理计算，不同干旱胁迫处理间各种指标之间的差异由单因素方差分析中Duncan检验完成，显著水平为0.05。采用Origin 8.5软件绘图。

2 结果与分析

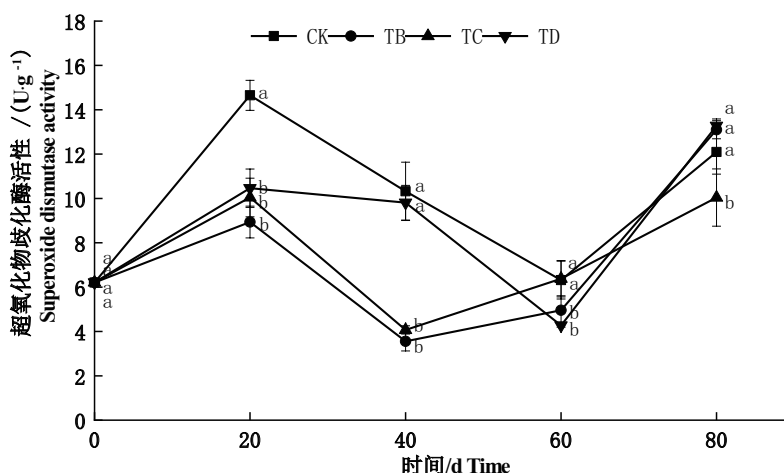
2.1 不同干旱胁迫处理对小叶黄杨叶片抗氧化酶活性的影响

2.1.1 超氧化物歧化酶（SOD）活性 由图1可知，随胁迫时间的延长，SOD活性变化趋势呈升高—降低—升高，20 d时，不同干旱胁迫处理间SOD差异不显著，但均显著低于CK处理（ $P < 0.05$ ），分别比CK处理降低了39.02%、31.44%、28.60%；40 d时，TB与TC处理的SOD活性达到最低，且显著低于CK与TD处理（ $P < 0.05$ ），TD与CK处理差异不显著；60 d时，TB和TD处理SOD活性显著低于CK处理（ $P < 0.05$ ），TC与CK处理差异不显著；80 d时，

TC处理SOD活性最低为 $10.04 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ ，且仅TC处理显著低于CK处理（ $P < 0.05$ ）。

2.1.2 过氧化氢酶（CAT）活性 由图2可知，随干旱胁迫程度和胁迫时间的增加，小叶黄杨叶片CAT活性呈先升高后降低的变化趋势。20 d时，TB、TC、TD处理的CAT活性均显著低于CK处理（ $P < 0.05$ ）；40 d时，TC处理CAT活性显著高于CK处理（ $P < 0.05$ ），TB和TD处理CAT活性也均高于CK处理，但差异不显著；60 d和80 d时，各处理的CAT活性均显著低于CK处理（ $P < 0.05$ ）。其中，60 d时，CK处理CAT活性最高为 $19.27 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ ，分别比其他处理高了17.92%、24.37%、32.57%。

2.1.3 过氧化物酶（POD）活性 由图3可知，随干旱胁迫时间的延长，各处理的POD活性呈先升高后降低再升高的变化趋势，在40 d达到峰值，分别比0 d增加了366.49%、461.06%、450.46%、335.35%；20 d时，不同干旱胁迫处理的POD活性均显著低于CK处理（ $P < 0.05$ ），而TC处理的POD活性显著高于TB与TD处理（ $P < 0.05$ ）；40 d时，TB和TC处理的POD活性显著高于CK处理（ $P < 0.05$ ），而TD处理的POD活性低于CK处理，但差异不显著；60 d时TB、TC、TD处理的POD活性均显著低于CK处理（ $P < 0.05$ ）；80 d时，TB、TC、TD处理的POD活性分别比CK处理低了10.86%、14.75%、17.68%，且TC处理分别与TB、TD处理差异不显著，TB

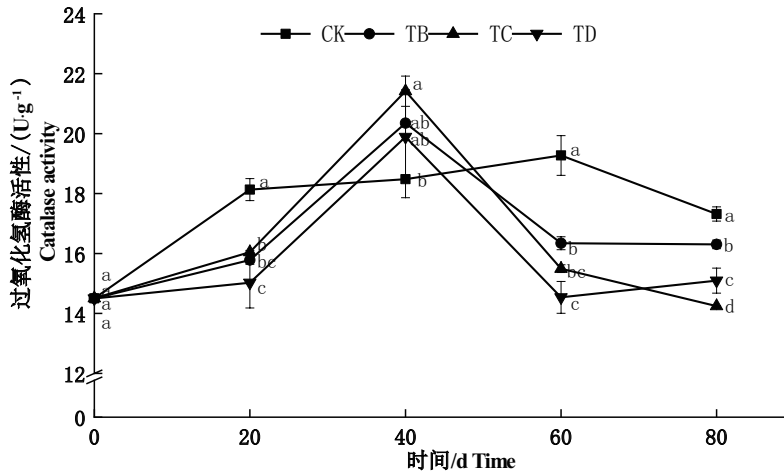


注：图中不同小写字母表示处理间差异达到5%显著水平。

Note: different lowercase letters in the figure indicate that significant difference between treatments at 5% levels.

图1 不同干旱胁迫处理下小叶黄杨叶片SOD活性的变化

Fig.1 Change of SOD activity in *B. microphylla* leaves under different drought stress treatments

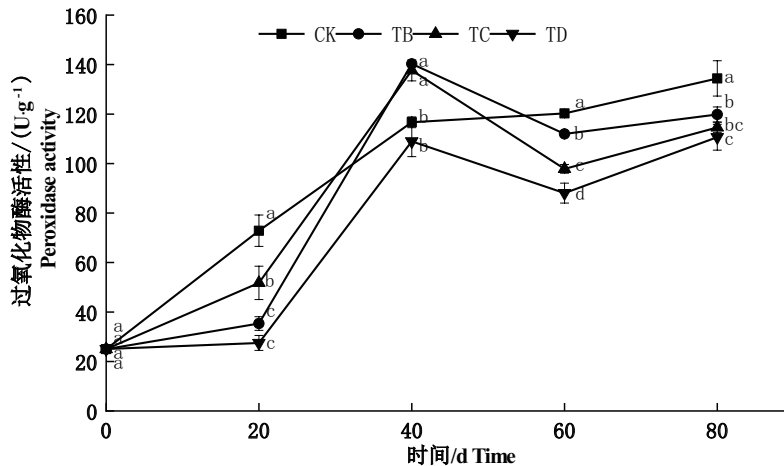


注：图中不同小写字母表示处理间差异达到 5% 显著水平。

Note: different lowercase letters in the figure indicate that significant difference between treatments at 5% levels.

图 2 不同干旱胁迫处理下小叶黄杨叶片 CAT 活性的变化

Fig.2 Change of CAT activity in *B. microphylla* leaves under different drought stress treatments



注：图中不同小写字母表示处理间差异达到 5% 显著水平。

Note: different lowercase letters in the figure indicate that significant difference between treatments at 5% levels.

图 3 不同干旱胁迫处理下小叶黄杨叶片 POD 活性的变化

Fig.3 Change of POD activity in *B. microphylla* leaves under different drought stress treatments

和 TD 处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

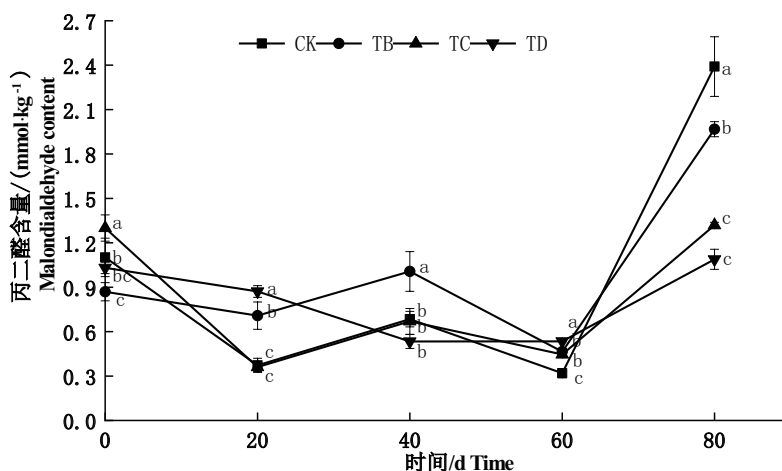
2.2 不同干旱胁迫处理对小叶黄杨叶片丙二醛 (MDA) 含量的影响

由图 4 可知, 随干旱胁迫时间的延长, 各处理的 MDA 含量大体上呈先降低后升高的变化趋势, 在干旱胁迫末期 (80 d) 均达最大值。与胁迫初期 (0 d) 相比, TB、TC、TD 处理在胁迫末期 (80 d) 的 MDA 含量分别提高 126.33%、1.46%、5.58%; 20 d 时, TB、TD 处理的 MDA 含量显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$), 而 TC 处理的 MDA 含量略低于 CK 处理; 40 d 时, 只有 TB 处理的 MDA 含量显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$); 60 d

时, TB、TC 和 TD 处理的 MDA 含量显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$); 80 d 时, TB、TC 和 TD 处理的 MDA 含量均显著低于 CK 处理 ($P < 0.05$)。此外, 80 d 与 60 d 时相比, TB、TC 和 TD 处理的 MDA 含量分别提高 323.51%、109.95%、103.61%。

2.3 不同干旱胁迫处理对小叶黄杨叶片可溶性蛋白质含量的影响

由图 5 可知, 随着干旱胁迫时间的增加和程度的加深, 小叶黄杨叶片可溶性蛋白质含量整体趋势先上升, 60 d 时达到峰值后下降。20 d 时, TB、TC、TD 处理的可溶性蛋白质含量均显著高

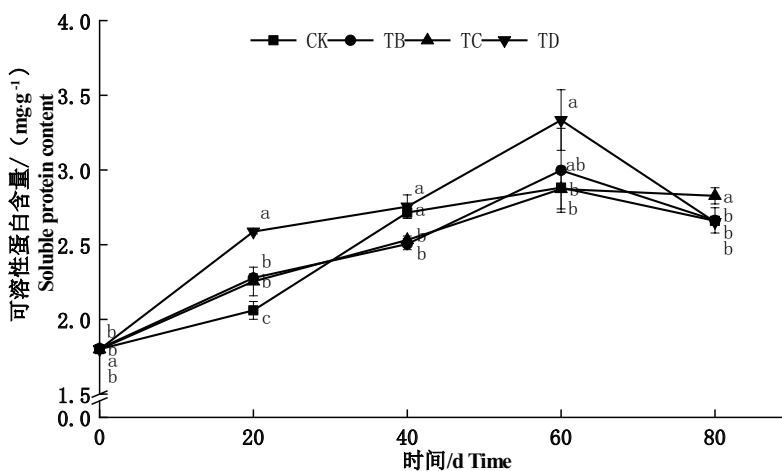


注：图中不同小写字母表示处理间差异达到 5% 显著水平。

Note: different lowercase letters in the figure indicate that significant difference between treatments at 5% levels.

图 4 不同干旱胁迫处理下小叶黄杨叶片 MDA 含量的变化

Fig.4 Change of MDA content in *B. microphylla* leaves under different drought stress treatments



注：图中不同小写字母表示处理间差异达到 5% 显著水平。

Note: different lowercase letters in the figure indicate that significant difference between treatments at 5% levels.

图 5 不同干旱胁迫处理下小叶黄杨叶片可溶性蛋白质含量的变化

Fig.5 Change of soluble protein content in *B. microphylla* leaves under different drought stress treatments

于 CK 处理 ($P < 0.05$), 其中 TD 处理的可溶性蛋白质含量最高为 $2.59 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$; 40 d 时, TB 和 TC 处理显著低于 CK 处理 ($P < 0.05$), 而 TD 处理的可溶性蛋白质含量略高于 CK 处理, 但差异不显著; 60 d 时, TB 和 TD 处理的可溶性蛋白质含量均高于 CK 处理, 其中 TD 处理显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$) 且含量最高为 $3.33 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 80 d 时, 除 TC 处理显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$) 外, 其他处理与 CK 处理相比均差异不显著。

2.4 不同干旱胁迫处理下各指标相关性

由表 1 可知, POD 活性与 SOD 活性、CAT 活

性、MDA 含量、可溶性蛋白质含量均呈正相关关系, 其中 POD 活性与 CAT 活性和可溶性蛋白质含量 ($P < 0.01$) 呈极显著相关关系, SOD 活性与 MDA 含量 ($P < 0.05$) 呈显著相关关系; CAT 活性和可溶性蛋白质含量均与 SOD 活性、MDA 含量呈负相关关系。

3 讨论与结论

3.1 干旱胁迫下过量的活性氧 (ROS) 会造成细胞膜脂过氧化, 损坏植物细胞和膜, 抗氧化酶可以促进植物抗逆性和防御系统^[12-13]。研究表明,

表 1 小叶黄杨叶片各指标相关性分析
Table 1 Correlation analysis of each indicator in *B. microphylla* leaves

指标 Item	超氧化物歧化酶活性 SOD activity	过氧化氢酶活性 CAT activity	过氧化物酶活性 POD activity	丙二醛含量 MDA content	可溶性蛋白质含量 Soluble protein content
超氧化物歧化酶活性 SOD activity	1				
过氧化氢酶活性 CAT activity	-0.083	1			
过氧化物酶活性 POD activity	0.044	0.641**	1		
丙二醛含量 MDA content	0.292*	-0.205	0.136	1	
可溶性蛋白质含量 Soluble protein content	-0.022	0.238	0.695**	-0.121	1

注：* 在 0.05 水平（双侧）上显著相关；** 在 0.01 水平（双侧）上显著相关。

Note: * significant correlation at the level of 0.05 (bilateral); ** significant correlation at 0.01 level (bilateral).

SOD 在干旱胁迫初期 0~20 d 时，含量增加迅速，20 d 时达到高峰。表明 0~20 d 时，小叶黄杨主要靠 SOD 清除 $\cdot\text{O}_2^-$ ，将其歧化为 H_2O_2 ，进而缓解干旱胁迫带来的伤害^[14]。相关研究表明，随着干旱胁迫的增强，孟连苗叶片的 SOD 活性呈现先升高后下降再升高变化的“S”曲线^[15]，本试验所得结论与上述观点一致。此外，本研究发现，正常水分处理的 SOD 活性在 20~60 d 时，呈下降趋势。这可能是因为 6—8 月屋顶温度较高，水分蒸发较快，一定程度上抑制了正常水分处理的 SOD 活性，使其整体下降。

本研究发现，在一定强度干旱胁迫下，小叶黄杨叶片 CAT 活性增加，严重的干旱胁迫可能会抑制 CAT 活性，40 d 时 CAT 活性达到峰值。CAT 可以将 H_2O_2 直接转化成 H_2O ，降低活性氧的含量。此外，清除 H_2O_2 可以清除细胞中的活性氧，缓解植物氧化损伤^[16-17]。本研究中，CAT 活性在 20~40 d 时，呈上升趋势，40 d 后下降。可能是因为 6 月 20 日—7 月 10 日温度逐渐升高，干旱胁迫对小叶黄杨的影响日益明显，而 7 月 10 日—8 月温度较高抑制了小叶黄杨的正常生长和代谢，进而 CAT 活性随之降低。熊仕发等^[18]研究表明，在干旱胁迫过程中，小叶黄杨叶片 CAT 活性变化呈现先上升后下降趋势，与本研究结果一致。

本研究发现，在 0~60 d 随着干旱胁迫的加剧，小叶黄杨叶片中 POD 活性先上升后下降，各干旱胁迫处理下的 POD 活性与 CK 处理相比均差异显

著，这可能是由于干旱胁迫下的膜脂过氧化作用，使得 H_2O_2 积累而导致 SOD 活性减弱，将超氧阴离子转化为 H_2O_2 的能力降低， H_2O_2 诱导 POD 活性增强，POD 将 H_2O_2 分解，防止 H_2O_2 与剩余超氧阴离子反应生成活性更强的 OH^- ，加剧氧化胁迫，从而达到维护机体免受活性氧的损伤^[19]。这与前人研究结果一致^[20-21]，但 60 d 后 POD 活性又上升，这可能是因为气温下降缓解了干旱胁迫程度。

MDA 含量在后期尤其是 60 d 后显著增加，质膜被破坏，大量离子外溢，其中轻度胁迫下质膜的损害严重，很多研究^[22-25]得出了与之相似的结果。干旱在前期不会对膜造成太大伤害，后期干旱程度加剧 MDA 含量增加。在轻度胁迫下 MDA 含量增加幅度已很大，尤其 60 d 后 MDA 含量出现大幅度增加，表明在干旱胁迫下，小叶黄杨体内氧自由基的积累导致 MDA 大量增加，从而使植株免受严重损害，赵婵璞等^[26]对匍枝委陵菜 *Potentilla flagellaris* 的研究与本试验研究结果一致。

3.2 可溶性蛋白质是植物体内重要的渗透调节物质，能明显提高细胞的结合水含量和持水能力^[27]。本研究发现，随着胁迫时间的增加，各处理可溶性蛋白质含量呈现先升高后降低的趋势，可溶性蛋白质含量的最大值出现在 60 d，这与高鹏飞等^[28]的研究结果一致。小叶黄杨的叶片因为膜受损伤蛋白质被释放出来，蛋白酶活性升高将蛋白质水解，而水解所得的氨基酸又用于合成如抗氧化酶等响应干旱胁迫的蛋白质，导致小叶黄杨叶

片前 60 d 的可溶性蛋白质含量增加^[29], 这也表明小叶黄杨有一定抗旱性, 与张卫红等^[30]对垂穗披碱草的研究结果一致。随着胁迫强度的增加, 在一定程度上抑制了蛋白质的合成或加快其降解速度, 导致可溶性蛋白质含量在 60 d 后下降, 这与王晓宇等^[31]研究结果相一致。也有相关研究表明, 干旱可抑制蛋白质合成, 诱导蛋白质降解, 从而降低某些植物的总蛋白质含量^[32]。

此外, 各处理在 60 d 之前可溶性蛋白质含量与干旱持续时间正相关, 可溶性蛋白质含量的增加也许能使植物细胞保持在低渗透电位水平, 保护细胞结构, 延缓衰老, 抵抗干旱胁迫造成的损害。随着干旱胁迫的加剧, 可溶性蛋白质含量的下降幅度也随之增大, 刺激了小叶黄杨保护酶系统做出保护性反应, 但随着胁迫时间的延长, 各胁迫处理的保护酶活性在达到最大值后均呈下降趋势, 这可能是因为过量 ROS 或 H₂O₂ 积累, 超过保护酶系统阈值, 打破动态平衡, 致使酶光钝化, 抑制新酶的合成。

3.3 在正常条件下, 植物活性氧的产生和清除处于动态平衡状态, 但在干旱胁迫下, 这种平衡被打破, 植物为维持正常的生长代谢, 必须依靠抗氧化酶系统清除活性氧^[33]。本研究发现, 在干旱胁迫的不同时期, POD 和 CAT 活性的降低与 MDA 的积累紧密相关, 两者可能互为因果关系。一方面, POD 和 CAT 活性降低使有害自由基积累超过损伤阈值, 可能直接或间接地引发膜脂过氧化, 增加 MDA 含量, 损伤膜系统; 另一方面, 随着 MDA 的积累, POD 和 CAT 活性受到抑制后降低, 从而失去了保护酶系统的功能, 进而加重膜系统的损伤。说明植物抗旱能力与保护酶活性及其防御功能有关^[34], 这可能是植物在干旱胁迫下的主要生理反应和损伤机制。此外, 可溶性蛋白质与 POD 活性和 MDA 含量关系密切。在干旱胁迫前期 (0 ~ 40 d), 可溶性蛋白质与 POD 活性变化一致, 说明二者协同作用以适应干旱逆境造成的伤害。在整个干旱胁迫过程中, 可溶性蛋白质与 MDA 含量的变化趋势相反, 可能是可溶性蛋白质含量的增加减轻了 MDA 的积累, 进而减轻干旱对植物的损伤。

综上所述, 干旱胁迫后, 小叶黄杨体内的保护酶系统做出响应, 使机体在一定程度上可以维持正常的生长和代谢等活动。在轻度和中度干旱

胁迫后, 保护酶活性的提高可以有效协调和维持氧化物含量的相对平衡, 减少有害氧化物积累所造成的损害; 重度胁迫后, 小叶黄杨保护酶系统和细胞遭受不可逆的损害, 不能发挥正常的保护机体的功能。总之, 小叶黄杨作为一种绿色植物, 具有较强的抗旱性, 在很大程度上能够适应逆境, 能够在屋顶这种特殊的环境下正常生长。

参考文献

- [1] ZHANG Y J, MURRAY ALAN T, TURNER B L. Optimizing green space locations to reduce daytime and nighttime urban heat island effects in Phoenix, Arizona[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 165: 162-171.
- [2] 陈水钦, 叶龙华, 莫云豹, 等. 基于 PEG 胁迫的美丽异木棉等园林景观树种抗旱性评价[J]. *林业与环境科学*, 2021, 37(2): 40-46.
- [3] 吴小青, 曹丹, 陈思逸, 等. 3 种景天植物对干旱胁迫的生理生化响应[J]. *黑龙江生态工程职业学院学报*, 2021, 34(4): 30-32, 151.
- [4] 周宇涵. 小叶黄杨对干旱高温胁迫的生理生化响应[J]. *农村实用技术*, 2019(3): 39-40.
- [5] 吴强, 李倩, 肖华, 周国富. 西南喀斯特地区小叶黄杨与白刺花光合特性研究[J]. *中国饲料*, 2019(9): 22-28.
- [6] 谭雪红. 5 种灌木的生理特性及抗旱性的综合评价[J]. *东北林业大学学报*, 2013, 41(2): 29-34.
- [7] 刘思奇. 美丽箬竹光合特性和抗氧化系统对干旱高温胁迫的响应[D]. 临安: 浙江农林大学, 2021.
- [8] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [9] 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, 2000.
- [10] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [11] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [12] LIU Y, MA W, NIU J, et al. Systematic analysis of SmWD40s, and responding of SmWD40-170 to drought stress by regulation of ABA-and H₂O₂-induced stomatal movement in *Salvia miltiorrhiza bunge*[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2020, 153: 131-140.
- [13] 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.
- [14] 李振庆. 棉花幼苗低盐驯化后对高盐胁迫的生理响应[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017.
- [15] 朱书红, 赵秀婷, 刘蔚漪, 等. 巨龙竹实生苗对干旱胁迫的形态及生理响应[J]. *世界竹藤通讯*, 2022, 20(1): 30-36.
- [16] SYED B A, PATEL M, PATEL A, et al. Regulation of an-

- tioxidant enzymes and osmo-protectant molecules by salt and drought responsive genes in *Bambusa balcooa*[J]. Journal of plant research, 2021, 134(1):165-175.
- [17] RANGANI J, PANDA A, PATEL M, et al. Regulation of ROS through proficient modulations of antioxidative defense system maintains the structural and functional integrity of photosynthetic apparatus and confers drought tolerance in the facultative halophyte *Salvadora persica* L.[J]. Journal Photochemistry Photobiology B, 2018, 189:214-233.
- [18] 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.
- [19] 陈珺, 赖齐贤, 何宝龙, 等. 土壤干旱对观赏植物活性氧产生和抗氧化酶活性的影响[J]. 西北植物学报, 2014, 34(7):1390-1396.
- [20] GUO Y Y, YU H Y, YANG M M, et al. Effect of drought stress on lipid peroxidation, osmotic adjustment and antioxidant enzyme activity of leaves and roots of *Lycium ruthenicum* Murr. seedling[J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2018, 65(2):244-250.
- [21] 苏志豪, 周晓兵, 姜小龙, 等. 不同土壤水分条件下沙生柽柳(*Tamarix taklamakanensis*)的生理生化特征及适应性[J]. 干旱区研究, 2021, 38(1):198-206.
- [22] BEYAZ R, YILDIZ M. Influence of Peg-induced drought stress on antioxidant components of callus tissue of sainfoin (*Onobrychis viciifolia* Scop.) Ecotypes[J]. Legume Research, 2021, 44(2):197-201.
- [23] WANG X, XIA J B, CAO X B. Physiological and ecological characteristics of *Periploca sepium* Bunge under drought stress on shell sand in the Yellow River Delta of China[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1):1-11.
- [24] ZHANG Q, ZHANG Y. Study on response to drought stress of MDA content in plants[J]. Forest Investigation Design, 2019(1):110-112.
- [25] 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.
- [26] 赵婵璞, 王卫军, 刘冬云, 等. 干旱胁迫对匍枝委陵菜形态及生理特性的影响[J]. 河北农业大学学报, 2013, 36(5):34-38.
- [27] 权文利, 产祝龙. 紫花苜蓿抗旱机制研究进展[J]. 生物技术通报, 2016, 32(10):34-41.
- [28] 高鹏飞, 张静, 范卫芳, 等. 干旱胁迫对光叉委陵菜根系特征、结构和生理特性的影响[J]. 草业学报, 2022, 31(2):203-212.
- [29] AHMED I M, CAO F, ZHANG M, et al. Difference in yield and physiological features in response to drought and salinity combined stress during anthesis in Tibetan wild and cultivated barleys[J]. PLoS One, 2013(8):e77869.
- [30] 张卫红, 刘大林, 苗彦军, 等. 西藏3种野生牧草苗期对干旱胁迫的响应[J]. 生态学报, 2017, 37(21):7277-7285.
- [31] 王晓宇, 张艳娥, 张林生. 4种非生物胁迫下小麦幼苗表型及可溶性蛋白含量的变化[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(2):113-117, 169.
- [32] 赵丹, 谢娜, 赵德刚. 楠木叶片响应干旱胁迫的乙酰化蛋白质组学分析[J]. 植物生理学报, 2021, 57(6):1371-1381.
- [33] 黄尧瑶, 邓明华, 彭春秀, 等. 百合花瓣抗氧化酶系统对干旱胁迫响应的研究[J]. 园艺学报, 2020, 47(4):788-796.
- [34] 于晓松, 王晓红, 李林, 等. 石漠化生境对三叶木通生长及生理特性的影响[J]. 生态学报, 2022, 4(26):1-12.