

水淹胁迫及排涝对榉树幼苗生长和生理特性的影响

樊菲菲¹, 袁位高², 李婷婷², 吴初平², 张 觉¹, 焦洁洁²

(1. 浙江农林大学 林业与生物技术学院, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江省林业科学研究院, 浙江 杭州 310023)

摘要:以2年生榉树 *Zelkova serrata* 实生容器苗为实验材料, 研究模拟根淹(RF)、半淹(SF)和近全淹(AF)处理及正常水分管理下(CK)榉树幼苗的生长和生理指标变化, 以及水淹胁迫后的排涝恢复实验对这些指标的影响, 综合评价榉树幼苗的耐水淹能力。结果表明, 水淹35 d后, 不同处理下的榉树幼苗出现了不同程度的落叶情况, 但全部存活; 水淹处理下榉树的苗高和地径相对增长量均小于CK; 不同程度的水淹处理均使榉树叶绿素含量降低, 但对抗氧化能力、膜脂过氧化作用以及渗透调节能力产生了不同的影响, 各水淹处理下SOD和POD活性总体上呈先降后升的趋势, MDA含量总体上呈先升后降的趋势, 可溶性糖和可溶性蛋白含量总体上呈波动性下降趋势。排涝14 d后, AF中榉树幼苗各项生理指标受到的负面影响最大, 但植株仍具有生命力和萌芽力, 表现出较强的耐淹性与恢复能力。

关键词: 榉树; 水淹胁迫; 生理响应; 排涝

中图分类号: S792

文献标识码: A

文章编号: 1001-3776(2018)01-0062-07

Effect of Water Logging and Drainage on Growth and Physiological Properties of *Zelkova serrata*

FAN Fei-fei¹, YUAN Wei-gao², LI Ting-ting², WU Chu-ping², ZHANG Jue¹, JIAO Jie-jie²

(1. College of Forest and Biotechnology, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China;

2. Zhejiang Academy of Forestry, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Experiments were conducted on water logging on 2-year container *Zelkova serrata* seedlings during August 1st of 205 and September 4th. Seedlings were treated by root flooding (RF), semi-submerged flooding (SF) and almost total flooding (AF), control (normal treatment) and after drainage. Determinations were implemented on growth and physiological properties at different stage of treatment. The results showed that seedlings treated by water logging had leaves fallen, but survived. Height and ground diameter growth of seedlings treated by water logging was smaller than the control, and chlorophyll content as well. The activity of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) in leaves of seedlings treated by water logging decreased at first and then increased. The content of malondialdehyde (MDA) had an opposite trend. The content of soluble sugar and protein showed a trend of decreasing. Physiological properties of seedling 14 days after drainage had negative effect on water logging, it concluded that *Z. serrata* seedlings had recovery capability under mild and moderate water logging.

Key words: *Zelkova schneideriana*; water logging; growth; physiological response; drainage

水分是维持植物正常生长的必要条件, 但土壤中水分过多会阻碍植物的呼吸, 造成植物组织缺氧, 对植物

收稿日期: 2017-06-30; 修回日期: 2017-11-07

基金项目: 国家“十三五”农业新品种选育重大专项林木新品种选育项目(2016C02056-11); 浙江省科技计划项目“榉树多品系种子园建设技术与示范”(2017F50005)

作者简介: 樊菲菲, 硕士研究生, 从事植物逆境生理研究; E-mail: 593548554@qq.com. 通信作者: 袁位高, 研究员, 博士, 从事森林生态经营与培育研究

的形态特性和生长发育会产生显著的负影响^[1], 如叶绿素降解加剧^[2], 保护酶系统受损^[3], 可溶性糖和可溶性蛋白含量发生变化^[4], 加剧植物叶片中细胞膜脂过氧化程度, 即丙二醛含量的积累^[5]。此外, 土壤中的水分胁迫对一些濒危稀有物种的影响更大, 如沙冬青 *Ammopiptanthus mongolicus*^[6], 杜鹃红山茶 *Camellia azalea* Wei^[7]等, 故而, 水分胁迫可能是影响物种灭亡的主要因子之一。

榉树 *Zelkova serrata* 属榆科 Ulmaceae 榉树属 *Zelkova* 落叶大乔木, 国家二级重点保护野生植物, 主要分布在我国秦岭及淮河以南, 长江中下游至华南、西南各省区^[8], 浙江是榉树主产区之一。榉树具有较高的经济和观赏价值^[9], 是浙江省优良的平原、河道绿化树种之一。目前, 国内关于榉树耐水淹能力的研究较少, 教忠意等^[10]对榉树受涝后叶形、叶色、脱落的叶片数、皮孔和不定根产生时间等形态特征进行了观察, 找出树种受涝时间长短的临界值和受淹后的形态变化, 以此来判断榉树耐水淹能力的强弱。本试验通过人工模拟水淹条件, 测定不同水淹梯度下榉树幼苗的叶片总叶绿素含量、超氧化物歧化酶 (SOD) 活性、过氧化物酶 (POD) 活性、丙二醛 (MDA) 含量、可溶性糖和可溶性蛋白含量, 旨在探索水淹胁迫对榉树的伤害机制以及榉树对水淹环境的适应机制, 为提高榉树栽培和造林工作中水分管理技术和浙江省河道生态建设中树种的选择提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

实验地点设在浙江省林业科学研究院温室大棚, 地处 118°21'~120°30' E, 29°11'~30°33' N。该区属典型的亚热带季风性湿润气候, 年平均气温 15.3~18.5℃, 最低月均气温 2.7~7.9℃, 最高月平均气温 27.0~29.5℃, ≥10℃年积温 4 800~5 800℃, 无霜期 225~280 d; 年降水量 1 000~2 000 mm, 以春雨、梅雨、台风雨为主, 7~8 月有伏旱。

1.2 试验设计

实验材料为 2015 年于浙江省建德市欣林中心播种培育的 2 年生营养袋容器苗(营养袋内径和高均为 15 cm), 选择生长状况相近的苗木作为试验对象, 平均苗高和地径分别为 (45.29±3.69) cm 和 (0.82±0.66) cm。设置 4 个处理, 分别为正常、轻度胁迫、中度胁迫和重度胁迫, 即对照 (CK)、根淹 (RF)、半淹 (SF) 和近全淹 (AF)。每个处理重复 5 次, 即 5 株。具体处理情况: 幼苗浇透后的次日, 将其 (对照除外) 放入 81 cm×70 cm×65 cm 的塑料箱中进行水淹处理。用泰州市正大科教仪器设备厂生产的 ZD-1608 土壤水分专用检测仪保持 CK 盆内土壤含水量在 75%~80%; RF, 土壤表面渗水, 水位不超过 1 cm; SF, 植株地上部分一半水淹; AF, 植株顶端露出水面约 3 cm。之后每天保持水位, 每隔 3 d 左右进行换水, 保证水体干净。将榉树的采样间隔期定为 7 d, 当水淹致使植株叶片萎蔫坏死约 50%时, 停止实验。胁迫从 2016 年 8 月 1 日开始, 9 月 4 日结束, 水淹共 35 d。实验结束时, 即于 9 月 5 日将植物从塑料箱中取出进行排涝, 盆内土壤含水量达到 CK 水平处理之后继续保持, 14 d 后 (R14 d), 即于 9 月 18 日测定植株各项生理指标。各水淹处理和排涝恢复实验的采样均在早上进行, 取每株苗木上中下部位生长良好、大小均一的成熟叶片 3~4 片, 用自来水清洗叶片表面污物, 再用蒸馏水冲洗 2~3 次后, 擦净表面水分, 混合采集叶片后进行生理指标测定, 重复 3 次。

1.3 测定内容与方法

于水淹胁迫开始前和排涝 14 d 后分别测定各处理下植物的苗高和地径。用卷尺测量苗高, 精确到 0.1 cm; 用游标卡尺在高于土面 1 cm 处测定地径, 精确到 0.01 mm。定株观测, 每处理 5 次重复。

相对增长量 = 排涝后测量值 - 胁迫前测量值

相对增长速率 = (相对增长量/胁迫前测量值) × 100%

测定各项生理指标时, 均取 0.1 g 样品。总叶绿素含量的测定采用直接浸提法测定; 超氧化物歧化酶 (SOD) 活性采用氮蓝四唑还原法测定; 丙二醛 (MDA) 含量采用硫代巴比妥酸法测定; 可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝法测定^[11]; 过氧化物酶 (POD) 活性参考汪南阳等采用愈创木酚法测定^[12]。

可溶性糖含量 ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$) = 可溶性糖浓度 $\times V/(FW \times 10^3)$ (V : 提取液总体积, mL; FW : 样品鲜质量, g)
可溶性糖浓度 ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$) = $11.71A_{450}^{[13]}$, 其中 A_{450} 测定方法同 MDA 的测定。吸光值测定均采用 UV-4802S 双光束紫外可见分光光度计进行。

1.4 数据处理

所得实验数据用 Excel 2016 进行整理, 用 Origin Pro 8.5 软件作图, 用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析以及相关性分析, 并用 Duncan 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 水淹胁迫对桉树苗高和地径的影响

由表 1 可知, 水淹胁迫及恢复后, 随着水淹胁迫程度的增加, 桉树幼苗的生长受到了显著的抑制作用。3 个水淹处理下的苗高相对增长量均显著低于 CK ($P<0.05$), RF, SF, AF 分别比 CK 下降了 63.38%, 70.0%, 84.93%。桉树幼苗地径相对增长量的变化趋势同苗高相对增长量的变化趋势相比, 下降幅度较小。三个水淹处理下的地径相对增长量, 从轻度到重度分别比 CK 下降了 13.73%, 37.25%, 53.92%。可以发现 AF 组各指标的下降幅度最大, 且处于 4 组处理的最低水平。

表 1 不同水淹处理对桉树苗高、地径生长的影响

Table 1 Effect of different treatments of water logging on height and ground diameter growth of <i>Z. serrata</i> seedlings				
胁迫处理	苗高相对增长量/cm	苗高相对增长率/%	地径相对增长量/mm	地径相对增长率/%
CK	7.10±1.56a	8.38	1.02±0.24a	12.67
RF	2.60±0.26b	3.05	0.88±0.33ab	9.94
SF	2.13±0.29b	2.56	0.64±0.13ab	8.18
AF	1.07±0.21b	1.26	0.47±0.11b	5.71

注: 表中数据为平均值±标准偏差, 不同字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

2.2 水淹胁迫对桉树叶片叶绿素含量的影响

由图 1 可见, CK 处理桉树幼苗叶片叶绿素含量的变化随着时间的延长呈先升后降的趋势, 生长前、中期叶绿素含量较高, 随后明显下降。RF 组没有改变叶绿素含量的总体变化趋势, 但明显降低了叶绿素的含量, 在胁迫时间超过 7 d 之后, 显著低于 CK ($P<0.05$)。SF 组叶绿素含量的变化情况同 RF 组相似, 但其叶绿素含量一直维持在低于 CK 却高于 RF 的水平。AF 组的桉树叶片叶绿素含量明显低于 CK, 其叶绿素含量的变化趋势受到的影响最显著。R14 d 后, 各处理下桉树叶片的叶绿素含量分别比胁迫 0 d 时下降了 20.50%, 38.54%, 38.66%, 59.28%。此时, 3 组水淹胁迫处理下的叶绿素含量显著低于 CK ($P<0.05$), 其中, AF 处理的叶绿素含量处于 4 组胁迫处理的最低水平。

2.3 水淹胁迫对桉树叶片 2 种主要抗氧化酶活性的影响

随着胁迫时间的延长, 不同处理下桉树幼苗叶片 SOD 活性的变化趋势也不同 (图 2A)。CK 组的 SOD 活性在 28 d 前随幼苗生长而逐渐下降, 在 28 d 时下降至最小值, 比 0 d 降低了 41.32%, 而后开始回升, 至 35 d 时酶活性接近 0 d 时的水平。随着胁迫程度的加深, 3 组水淹处理下 SOD 活性的升降变化幅度加大, 均在生长前期不断下降, 又在 21 d 时急速上升, 与 CK 相比, 回升速度加快; 之后 3 组水淹处理内 SOD 酶活性的变化趋势各有不同, 胁迫至 35 d 时, RF 和 AF 组的酶活性分别比

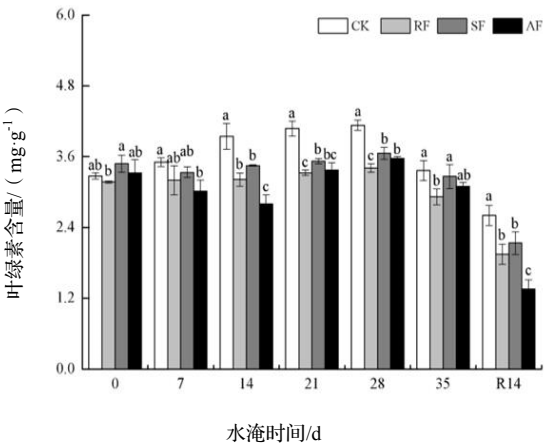


图 1 水淹胁迫对桉树叶片叶绿素含量的影响
Figure 1 Effect of water logging on chlorophyll content in leaves of *Z. serrata* seedlings

0 d 升高了 32.64%, 39.27%, 而 SF 组的酶活性仅升高 9.76%。总体上看, 3 组水淹处理下榉树叶片 SOD 活性在胁迫中后期一直保持着显著高于 CK 组的水平 ($P<0.05$), 其中, AF 组的酶活性处于处理间最高水平。至 R14 d 时, 各处理下榉树叶片 SOD 活性与 0 d 时相比升降幅度不大, 其中, AF 组的酶活性上升, 其他则下降。此时, 只有 AF 组的酶活性显著高于其他 3 组处理水平 ($P<0.05$)。

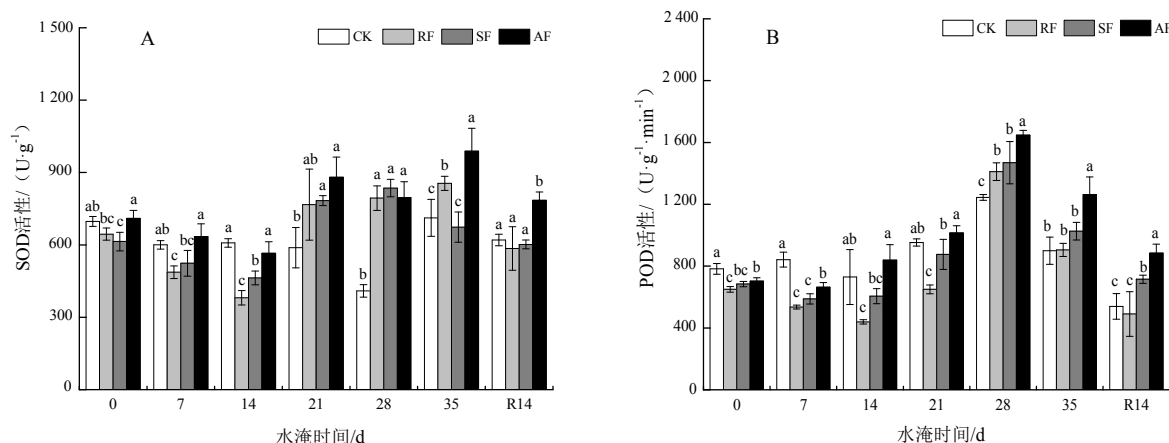


图 2 水淹胁迫对榉树叶片抗氧化酶活性的影响

Figure 2 Effect of water logging on antioxidant enzyme activities in leaves of *Z. serrata* seedlings

由图 2B 可见, 随着胁迫时间的延长, 各水淹处理下榉树幼苗叶片 POD 活性的变化总体上均呈先升后降的趋势, 且均在胁迫至 28 d 时达到组内最大值, 依次比 0 d 提高了 0.59, 1.17, 1.14, 1.34 倍。但水淹胁迫后对 3 组水淹处理下 POD 酶活性的升降幅度产生了不同影响, RF 和 SF 组的酶活性在 28 d 之前一直处于较低的水平, 在 28 d 时酶活性急速上升并显著超过 CK 组 ($P<0.05$); AF 组的 POD 酶活性在胁迫时间超过 7 d 之后, 一直维持着明显高于 CK 组的水平。至 35 d 时, 4 组处理下叶片 POD 的酶活性开始大幅度下降, 但依旧高于 0 d, 分别升高了 15.01%, 39.25%, 50.03%, 79.67%, AF 组的酶活性显著高于其他组水平 ($P<0.05$)。至 R14 d 时, CK 和 RF 组的酶活性分别比 0 d 下降了 31.05%, 24.50%, 而其他处理下依旧保持较高的酶活性水平。此时, AF 组的 POD 酶活性处于 4 组处理间的最高水平。

2.4 水淹胁迫对榉树叶片丙二醛含量的影响

由图 3 可见, 随着胁迫时间的延长, 各处理下榉树幼苗叶片 MDA 含量均呈先升后降的变化趋势, 但 CK 组的 MDA 含量在 14 d 时已经上升到组内最大值, 而 3 组水淹处理下的 MDA 含量均在 21 d 时达到最高水平, 且显著高于 CK ($P<0.05$), 分别比 0 d 提高了 1.30, 1.70, 1.57 倍; 至 35 d 时, 4 组处理下的 MDA 含量依次比 0 d 升高了 26.0%, 66.60%, 73.02%, 79.36%。RF 组 MDA 含量的升降幅度小于 CK 组; SF 组 MDA 含量的水平整体上高于 RF; AF 组的 MDA 含量在整个水淹期内一直保持着较高水平, 在胁迫中后期显著高于其他处理 ($P<0.05$)。至 R14d 时, 各水淹处理下榉树叶片 MDA 含量与 0 d 相比分别升高了 16.23%, 17.20%, 19.05%, 17.01%。

2.5 水淹胁迫对榉树叶片渗透调节物质的影响

各胁迫处理下榉树叶片可溶性糖含量随着时间的延长变化波动较大 (图 4A)。CK 组内叶片可溶性糖含量

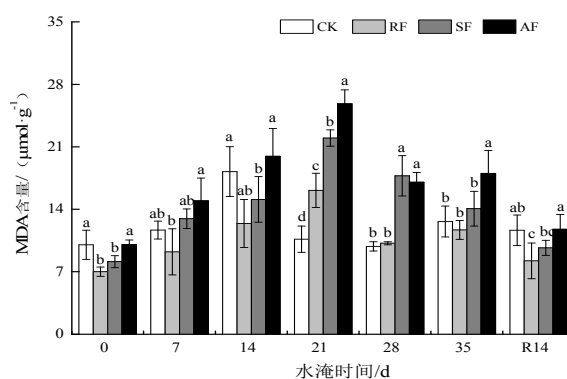


图 3 水淹胁迫对榉树叶片 MDA 含量的影响

Figure 3 Effect of water logging on MDA content in leaves of *Z. serrata* seedlings

呈不断大幅度下降趋势, 在 35 d 时比 0 d 时下降了 55.0%。3 个水淹组内可溶性糖的含量总体上呈波浪性变化, 在胁迫前期含量不断下降, 随后含量上升, 胁迫至 35 d 时又下降, 分别比 0 d 下降了 41.18%, 12.70%, 17.32%。RF 和 SF 组内可溶性糖含量在胁迫中后期显著超过 CK ($P<0.05$); AF 组内含量则在整个水淹过程中一直处于 4 组处理的最高水平。至 R14 d 时, 只有 CK 组内的可溶性糖含量急速上升, 比 0 d 时高了 36.17%, 而其他 3 组的可溶性糖含量均显著低于 CK 组 ($P<0.05$), 且基本恢复至 0 d 时的水平范围内。

由图 4B 可见, 各处理下可溶性蛋白含量的变化幅度也很大, 整体上均幼苗生长前期呈不同程度下降, 随后含量上升。CK 组的可溶性蛋白含量在 35 d 时上升到组内最大值, 比 0 d 高了 14.71%, 但经过水淹后, 缩短了蛋白含量达到处理内最高水平的时间。RF 和 SF 组、AF 组的蛋白含量在 28 d、21 d 达到峰值, 分别比 0 d 高了 36.35%, 42.18%, 13.29%。RF 组的蛋白含量降低或升高的幅度明显大于其他处理; 水淹前 SF 组内蛋白含量水平最低, 但在胁迫中后期上升速度较快, 并显著超过 CK 组的水平 ($P<0.05$); AF 组的蛋白含量的下降速度较快, 至 35 d 时显著低于其他处理内水平 ($P<0.05$), 比 0 d 下降了 40.62%。至 R14 d 时, 3 组水淹处理下的可溶性蛋白含量均显著低于 CK ($P<0.05$), 分别比 0 d 降低了 62.22%, 53.92%, 67.16%。

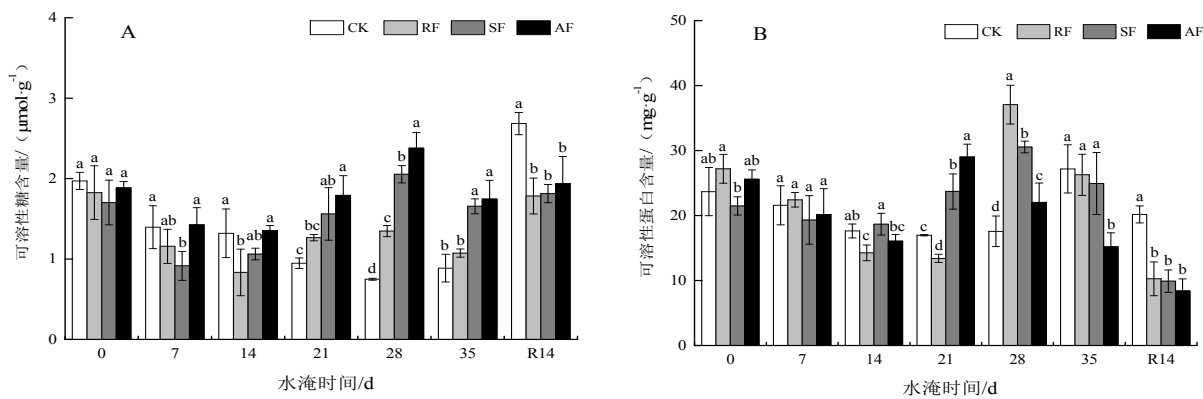


图 4 水淹胁迫对榉树叶片渗透调节物质的影响

Figure 4 Effects of flooding stress on osmotic adjusting substances in leaves of *Z. serrata* seedlings

2.6 水淹胁迫下榉树各项生理指标间的相关性

由表 2 可知, 各项生理指标之间相关性较弱, 但存在一定联系。叶绿素总含量与 POD 活性呈显著正相关, 与可溶性糖含量呈显著负相关, 与可溶性蛋白含量呈极显著正相关; SOD 活性与 POD 活性、可溶性糖含量呈极显著正相关, 与 MDA 含量、可溶性蛋白含量呈显著正相关。POD 活性与可溶性蛋白含量呈显著正相关。再结合各指标在水淹胁迫处理下响应的稳定性, 确定主要指标为叶绿素、酶活性和 MDA。

表 2 不同水淹处理下榉树叶片生理指标变化的相关性分析
Table 2 Analysis of correlation about changes of physiological indexes of *Z. serrata* under different flooding treatment

指标	叶绿素含量	SOD 活性	POD 活性	MDA 含量	可溶性糖含量	可溶性蛋白含量
叶绿素总含量	1.000					
SOD 活性	-0.112	1.000				
POD 活性	0.325*	0.555**	1.000			
MDA 含量	0.207	0.426*	0.317	1.000		
可溶性糖含量	-0.379*	0.462**	0.193	0.078	1.000	
可溶性蛋白含量	0.481**	0.347*	0.415*	0.100	0.065	1.000

注: *表示在 $\alpha=0.05$ 水平差异显著, **表示在 $\alpha=0.01$ 水平差异极显著。

3 讨论与结论

在水淹环境下, 长时间的供氧不足将导致植物由有氧呼吸逐渐向无氧呼吸转变, 植物生长因此受到影响^[14]。

植物生长受到的抑制作用一般随胁迫程度的加深而越显著。本实验中, 处理间的苗高和地径相对增长量的顺序均为 CK>RF>SF>AF。榉树在水淹环境中可采取“静默策略”^[15], 即抑制地上部分生长, 减少养分消耗, 提高自身对水淹的耐受性^[16]。

水淹造成厌氧或缺氧的生长环境, 阻碍植物根系内部矿物质的运输, 造成地上部分营养不良, 叶片发黄, 叶绿素含量下降^[17-18]。本实验中, 3 种水淹胁迫明显抑制了榉树叶片叶绿素含量的积累; 排涝后, 水淹组的叶绿素含量均小于胁迫前水平, CK 组的叶绿素含量也有所下降, 下降幅度大小顺序为: AF>SF>RF>CK。植物自身生长受到季节更替时的气温影响, 导致叶片叶绿素含量有所下降。另外, 随着胁迫程度的加深, 水淹植物的叶绿体膜结构受到的损害越严重, 加快了叶绿素的降解^[19]。水淹植物的叶绿素含量受到生长条件和胁迫环境的双重影响而下降更为显著。

SOD 和 POD 是植物体内普遍存在且活性较高的两种活性氧清除酶, 在植物受到逆境胁迫时, 可抵御活性氧自由基带来的毒害作用; MDA 含量的高低可以反映细胞膜脂过氧化程度和植物逆境条件反应的强弱^[20-23]。本实验中, 水淹胁迫显著提高了酶活性和 MDA 含量, 且排涝后重度胁迫下酶活性仍保持较高活性, MDA 含量则下降接近水淹前水平。说明该胁迫未超出植物细胞的承受能力, 细胞仍可以通过调节两者之间的相互作用, 清除细胞内过多氧自由基并降低膜脂过氧化程度来提高植物的逆境适应性和存活能力^[24-25]。

植物在水淹环境下可以通过调节可溶性糖和可溶性蛋白的含量来保持细胞渗透势的平衡, 以此抵抗水分胁迫带来的伤害^[18]。本实验中, 3 种水淹胁迫不同程度地提升了榉树的可溶性糖和可溶性蛋白的含量, 植物自身可通过积累大量可溶性糖和蛋白来降低细胞渗透势, 缓解水淹下胁迫对细胞膜系统造成的伤害^[20,26]。排涝后前者含量仍能维持在水淹前的生理水平范围内, 但后者含量显著下降, 其中重度水淹胁迫的下降幅度最大。此时胁迫已超过植物细胞的耐受极限, 蛋白酶的活性迅速提高, 加快了蛋白质的水解, 促使蛋白质大量降解成可溶性糖等物质^[27-28], 以此提高榉树对水分胁迫的适应性。这与利容千等^[29]对植物抗性指标研究所得结论一致。

综上所述, 榉树会通过改变生长形态和生理调节作用来应对水淹胁迫带来的伤害, 即使在重度胁迫下榉树仍具有较高的酶活性、膜脂过氧化程度和渗透调节能力。所有受淹植株在排涝后均能重新萌叶, 表现出较强的耐水淹能力与自我恢复能力。这一结论为榉树在推进“森林浙江”、“1818 平原绿化行动”、“五水共治”中晋升为优良平原、河道绿化树种中进一步提供了有效依据。

致谢: 感谢浙江大学刘金亮和刘佳佳博士对论文修改给出了指导性的意见和建议; 感谢建德林场工作人员对本实验的支持与配合, 以及同学在实验过程中提供的帮助。

参考文献:

- [1] 衣英华, 樊大勇, 谢宗强, 等. 模拟淹水对枫杨和栓皮栎气体交换、叶绿素荧光和水势的影响[J]. 植物生态学报, 2006, 30(6): 960-968.
- [2] 赵彦绯, 赵阳, 张驰, 等. 模拟淹水对杞柳生长和光合特性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(3): 898-906.
- [3] 杨鹏, 胥晓. 淹水胁迫对青杨雌雄幼苗生理特性和生长的影响[J]. 植物生态学报, 2012, 36(1): 81-87.
- [4] 卓仁英, 陈益泰. 木本植物抗涝性研究进展[J]. 林业科学研究, 2001, 14(2): 215-222.
- [5] 罗祺, 张纪林, 郝日明, 等. 水淹胁迫下 10 个树种某些生理指标的变化及其耐水淹能力的比较[J]. 植物资源与环境学报, 2007, 16(1): 69-73.
- [6] 何炎红, 田有亮, 林涛等. 水分胁迫对沙冬青气体交换和叶绿素荧光的影响[J]. 广东农业科学, 2014, 22(10): 42-47.
- [7] 吴丽萍, 王廷芹, 杨瑞. 珍稀濒危植物杜鹃红山茶嫁接苗对水分胁迫的生理响应[J]. 福建林业科技, 2012, 39(3): 51-56.
- [8] 汪灵丹, 张日清. 榉树的研究进展[J]. 广西林业科学, 2005, 34(4): 188-191, 211.
- [9] 赵旺兔. 榉树生物学特性及园林应用研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2003: 2-6.
- [10] 教忠意, 罗祺, 张纪林, 等. 10 个树种耐水淹能力的比较[J]. 江苏林业科技, 2007, 34(1): 15-18.
- [11] 高俊凤. 植物生理实验学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 74-77, 142-144, 210-213.
- [12] 汪南阳. 盐胁迫下杨树的生理响应及其胞外蛋白双向电泳分析[D]. 南京: 南京林业大学, 2013: 13.
- [13] 徐世伟. 榉树、弗吉尼亚栎和女贞幼苗的耐旱特性及评价[D]. 南京: 南京林业大学, 2014: 10.

- [14] MUKASSABI T A, POLWART A, COLESHAW T, *et al.* How long can young Scots pine seedlings survive waterlogging[J]. *Trees*, 2012, 26 (5) : 1641 – 1649.
- [15] NISHIUCHI S, YAMAUCHI T, TAKAHASHI H, *et al.* Mechanisms for coping with submergence and waterlogging in rice[J]. *Rice*, 2012, 5 (17) : 2314 – 2322.
- [16] 熊怀阳, 阳菁, 安保光, 等. 水稻适应淹水胁迫的分子机理及品种改良[J]. 武汉大学学报: 理学版, 2013, 59 (1) : 17 – 23.
- [17] 王萍, 胡永红, 王丽勉, 等. 观赏植物耐涝性鉴定指标的种类及其评价方法[J]. 北方园艺, 2007, 14 (11) : 78 – 81.
- [18] 谭淑端, 朱明勇, 张克荣, 等. 植物对水淹胁迫的响应与适应[J]. 生态学杂志, 2009, 28 (9) : 1871 – 1877.
- [19] 陈芳清, 郭成圆, 王传华, 等. 水淹对秋华柳幼苗生理生态特征的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19 (6) : 1229 – 1233.
- [20] 潘澜, 薛立. 植物淹水胁迫的生理学机制研究进展[J]. 生态学杂志, 2012, 31 (10) : 2662 – 2672.
- [21] 安玉艳, 梁宗锁, 郝文芳. 杠柳幼苗对不同强度干旱胁迫的生长与生理响应[J]. 生态学报, 2011, 31 (3) : 716 – 725.
- [22] SUN O J, SWEET G B, WHITHEAD D, *et al.* Physiological responses to water stress and waterlogging in *Nothofagus* species[J]. *Tree Physiol*, 1995, 15 (10) : 220 – 225.
- [23] 张秋芳, 吕春平, 贝昭贤, 等. 野外模拟增温对亚热带杉木叶片膜脂过氧化及保护酶活性的影响[J]. 植物生态学报, 2016, 40 (12) : 1230 – 1237.
- [24] 梁建萍, 贾小云, 刘亚令, 等. 干旱胁迫对蒙古黄芪生长及根部次生代谢物含量的影响[J]. 生态学报, 2016, 36 (14) : 4415 – 4422.
- [25] 孙一荣, 朱教君. 水分处理对沙地樟子松幼苗膜脂过氧化作用及保护酶活性影响[J]. 生态学杂志, 2008, 27 (5) : 729 – 734.
- [26] 李映乐. 青竹复叶槭耐水淹与耐低温生理研究[D]. 河南: 河南农业大学, 2008: 2 – 4.
- [27] 陈蕾太, 孙爱清, 杨敏, 等. 逆境条件下小麦种子活力与种子萌发相关酶活性及其基因表达的关系[J]. 应用生态学报, 2017, 28 (2) : 609 – 619.
- [28] HONG Z, LIU Q Y, ZHANG X Q. Physiological responses on *Sedum yvesii* under Water Stress[J]. *Adv Mater Res*, 2015, 3 (1073) : 52 – 60.
- [29] 利容千, 王建波. 植物逆境细胞及生理学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002: 34 – 37.