

干旱胁迫下厚朴幼苗的生理指标及次生代谢产物对保水剂的响应

曾智^{1,2}, 陈根洪^{1,3}, 滕树锐^{1,4}, 刘晓鹏^{1,3}, 江念^{1,3}, 郑小江^{1,3}

(1. 湖北省民族生物资源保护与利用重点实验室, 湖北恩施 445000; 2. 中国科学院西北高原生物研究所藏药研究重点实验室, 青海西宁 810001; 3. 湖北民族学院生物科学与技术学院, 湖北恩施 445000; 4. 湖北民族学院林学院园艺学院, 湖北恩施 445000)

摘要: 以1年生紫油厚朴 (*Magnolia officinalis*) 为试验材料, 采用盆栽试验, 设置了多功能型、钠盐型、钾盐型3类保水剂处理和空白对照, 分别进行干旱和不干旱处理。研究紫油厚朴幼苗抗氧化酶活性、膜脂过氧化程度和次生代谢产物对干旱胁迫的响应。结果表明: 干旱胁迫下, 丙二醛(MDA)和超氧阴离子(O_2^-)含量在4组处理中均显著增强($P < 0.05$)。过氧化氢(H_2O_2)含量和过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)4种抗氧化酶的活性均增加, 且均在空白对照和钠盐型保水剂组中分别达到显著差异水平($P < 0.05$); 可溶性蛋白、脯氨酸和可溶性糖的积累量在干旱胁迫下均有不同程度的增加($P < 0.05$); 次生代谢产物——厚朴酚和厚朴酮的积累量均有不同程度的上升, 二者在钠盐型保水剂组中未增加, 而在钾盐型保水剂组显著增加。综上所述, 钾盐和多功能型保水剂处理在厚朴幼苗受到干旱胁迫时渗透调节物质积累增多, 抗氧化酶活性提高, 膜脂过氧化程度减轻, 叶片的抗旱性增强; 更重要的是适度干旱和适量钾肥有利于主要药效成分厚朴酚和厚朴酮的积累。

关键词: 干旱胁迫; 保水剂; 紫油厚朴; 抗氧化酶系; 生理指标; 次生代谢产物

中图分类号: Q945.78 文献标识码: A 文章编号: 1671-5470(2016)05-0544-06

DOI: 10.13323/j.cnki.j.fafu(nat.sci.).2016.05.011

Responses of physiology and secondary metabolites in *Magnolia officinalis* seedlings to super absorbent polymers under drought stress

ZENG Zhi^{1,2}, CHEN Genhong^{1,3}, TENG Shurui^{1,4}, LIU Xiaopeng^{1,3}, JIANG Nian^{1,3}, ZHENG Xiaojiang^{1,3}

(1. Key Laboratory of Biological Resources Protection and Utilization of Hubei Province, Enshi, Hubei 445000, China;

2. Key Laboratory of Tibetan Medicine Research, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai 810001, China;

3. College of Biological Science and Technology, Hubei University for Nationalities, Enshi, Hubei 445000, China;

4. School of Forestry and Horticulture, Hubei University for Nationalities, Enshi, Hubei 445000, China)

Abstract: To investigate the effect of super absorbent polymer (SAP) on physiology of *Magnolia officinalis*, 3 types of SAPs, including sodium (Na), potassium (K) and multifunctional (X) were added to one-year-old seedlings, and changes in antioxidant enzyme activities, lipid peroxidation and accumulation of osmoregulation substances in both drought (D) and regularly irrigated groups were recorded. Results showed that contents of malondialdehyde (MDA) and O_2^- significantly increased in 4 drought groups ($P < 0.05$). H_2O_2 and all enzymes including catalase (CAT), peroxidase (POD), superoxide dismutase (SOD) and ascorbate peroxidase (APX) in leaves increased significantly in groups of control under drought (N+D) and Na-SAP under drought (Na+D). Accumulations of soluble protein, proline and soluble sugar all increased under drought stress ($P < 0.05$). Under drought stress, magnolol and honokiol levels elevated to some extent except staying the same in group Na+D, however, their levels increased significantly in groups of K+D. In conclusion, both K- and X-SAPs ameliorated drought stress for *M. officinalis* seedlings in terms of accumulated osmoregulation substances, enhanced activities of antioxidant enzymes, and mitigated membrane lipid peroxidation. More importantly, the main medicinal compounds, magnolol and honokiol increased when K-SAP was applied.

Key words: drought stress; super absorbent polymer; *Magnolia officinalis*; antioxidant enzyme; physiological index; secondary metabolites

收稿日期: 2015-12-31 修回日期: 2016-03-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(81460573); 生物资源保护与利用湖北省重点实验室开放基金项目(PKLHB1525)。

作者简介: 曾智(1986-), 女, 博士研究生。研究方向: 天然药物化学。Email: zengzhi11@outlook.com。通讯作者郑小江(1958-), 男, 教授, 硕士生导师。研究方向: 植物生理及资源开发研究。Email: hbzj123@126.com。

保水剂又称为超强吸水剂,是一种强亲水性基团适度交联形成的具有松散网络结构的新型功能高分子材料。其既不溶于水也难溶于有机溶剂,能在短时间内吸收自身质量几百倍的水,并具有良好的保水性能^[1-4]。随着保水剂应用的拓展,种类已越来越多,主要包括淀粉系列^[1]、纤维素系列^[2-4]及合成聚合物系列。前两类是以淀粉或纤维素为底物,接枝共聚亲水性或水解后有亲水性的单体,具有低成本、废物资源化、易被降解的潜力^[5]。尤其纤维素类来源广泛,是具有广阔开发前景的环境友好型保水材料。合成聚合物类多直接由丙烯酸盐交联制得,虽然其反应简单易得且吸水率高,但试剂残留、危害健康、不宜被降解等缺点,限制了这类保水剂的应用及研发^[6-7]。在干旱半干旱地区,种子萌发或育苗^[8-9]时施用适量的保水剂,不仅提高了种苗的萌发率和成活率,提高农作物如棉花^[10]、马铃薯^[11]、西瓜^[12]、花生^[13]的产量和品质,对土壤沙化的治理和防护也具有显著效果^[10],但对乔木的应用还比较有限。

厚朴(*Magnolia officinalis* Rehd. et Wils.)为木兰科木兰属乔木,是我国特有的珍稀保护植物和珍贵中药材,被列为国家二级保护植物和二级保护中药材^[14-15]。厚朴以树皮为药材,主要药效成分为和厚朴酚与厚朴酚,具有抗过敏、抗抑郁、抑制酶活性、抗凝血、降胆固醇、降血压、抗菌消炎、抗肿瘤、抗焦虑^[16-23]等作用。传统厚朴中药以野生资源为主,由于市场供不应求,许多产区无皮可产、无花可收^[15]。若能在干旱半干旱地区推广种植提高产量,将有效缓解供求紧张。但厚朴主要生长于较湿润地区,如何在保证品质的情况下适应干旱半干旱地区的生长条件亟待解决。为此,保水剂作为土壤微环境的改良剂,为资源开发研究者提供了方向。

本试验以恩施道地药材紫油厚朴为材料,通过盆栽试验对1年生幼苗进行干旱胁迫处理,测定其各项生理指标及次生代谢产物积累量,研究在干旱胁迫下保水剂对其生理及品质的影响,为推广厚朴种植及提高品质提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 材料

本试验所用的1年生紫油厚朴幼苗均由湖北省农科院中药材研究所华中药用植物园(湖北恩施市新塘乡长岭岗)提供。栽培基质为湖北民族学院后山的黄沙土,除去大块杂质后过20目筛,通风晾干。钠盐型和钾盐型保水剂购自广东省中山市恒广源吸水材料有限公司,为白色颗粒;复合多功能型保水剂购于山东省东营市华业新材料有限公司,粉末状。其他试剂为国药标准。

1.2 材料栽培与处理

1.2.1 处理设置 试验共设置8个处理:(1)不添加保水剂且供水处理,记为处理N;(2)不添加保水剂但干旱处理,记为处理(N+D);(3)钠盐型保水剂和供水处理,记为处理Na;(4)钠盐型保水剂但干旱处理,记为处理(Na+D);(5)钾盐型保水剂和供水处理,记为处理K;(6)钾盐型保水剂但干旱处理,记为处理(K+D);(7)多功能型保水剂和供水处理,记为处理X;(8)多功能型保水剂但干旱处理,记为处理(X+D)。每处理3个重复,即3株幼苗,共72株幼苗。

1.2.2 材料栽培 按0.4:1000(保水剂与黄沙土的干物质质量比)加入保水剂,即每盆装入约2kg干燥的黄沙土基质和0.8g的保水剂,处理N和N+D除外。选取高矮、茎杆粗细一致的幼苗直立于盆中,保水剂置于幼苗根部,覆上黄沙土。每盆1株幼苗。移栽后用Hoagland完全营养液^[24]浇透基质,每隔3~5d浇一次营养液,保证幼苗的正常生长。

1.2.3 干旱胁迫处理 待幼苗生长状态稳定,约20d后对干旱处理组进行干旱胁迫。用塑料袋套住幼苗,花盆基部密封,防止土壤水分受自然蒸发及降雨的影响。干旱胁迫处理组在干旱胁迫期间停止营养液补给。叶片出现萎蔫时即取样测定各项生理指标。

1.3 生理指标及次生代谢产物测定

1.3.1 抗氧化酶系活性及生理指标测定 取样:当干旱胁迫处理组出现萎蔫的叶片时,选取顶端往下第3~4片叶片,置于冰上带回实验室。用纯水洗去尘土并用滤纸擦净,用清洁的剪刀迅速剪碎,称取适量置于冰浴预冷的研钵中,再加入适量石英砂和pH7.8的磷酸缓冲液。研碎后转移到离心管中,在4℃5000r·min⁻¹离心15min,取上层清液测定各项生理指标。

过氧化氢酶(catalase, CAT)、过氧化物酶(peroxidase, POD)、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD) 和抗坏血酸过氧化物酶(ascorbate peroxidase, APX) 的活性测定采用经典比色法^[25-26]; 可溶性蛋白含量测定采用考马斯亮蓝 G-250 比色法^[25-26]; 可溶性糖含量测定采用苯酚硫酸法^[27]; 脯氨酸含量测定采用磺基水杨酸法^[26]; 丙二醛(malondialdehyde, MDA) 含量测定采用硫代巴比妥酸法(TBA 法)^[26]; 超氧阴离子(O_2^-) 含量测定采用 Wang^[28] 的方法; 过氧化氢(H_2O_2) 含量测定采用二甲酚橙显色法^[29]. 光密度(D) 均由 TU-4901 双光束紫外可见分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司) 测定.

1.3.2 厚朴酚与和厚朴酚含量的测定 取样: 待上述各项生理指标测量完毕, 取各处理组的幼苗 3 棵, 剥离茎皮, 置于 60 °C 烘箱中烘干, 粉碎, 装入自封袋, 室温保存于干燥皿中, 待测.

制样: 称取 0.20 g 茎皮干粉末置于具塞试管中, 加入甲醇 25 mL, 摇匀, 密塞, 浸渍 24 h; 滤过, 量取滤液 5 mL, 定容至 25 mL, 摇匀, 吸取上述溶液 20 μ L, 过 0.45 μ m 膜, 取 10 μ L 进行高效液相色谱(杭州赛析科技有限公司) 分析.

标准曲线: 分别称取 10 mg 厚朴酚与和厚朴酚标准品, 用甲醇溶解并定容至 10 mL, 即 1 mg \cdot mL⁻¹ 的标准溶液, 再用甲醇依次稀释至 20、40、60、80 和 100 μ g \cdot mL⁻¹ 的标准溶液, 进样 10 μ L, 得厚朴酚标准曲线方程: $y = 3872x - 1649$, $R^2 = 0.9998$; 和厚朴酚的标准曲线方程: $y = 6897x - 1162$, $R^2 = 0.9998$. 根据标准曲线计算出茎皮的厚朴酚与和厚朴酚的含量.

HPLC 的条件^[30-31]: 色谱柱 Lichrospher C18 (250 mm \times 4.6 mm 5 μ m) 购自江苏汉邦科技有限公司, 流动相为甲醇—水(78: 22), 流速设为 1 mL \cdot min⁻¹, 检测波长 294 nm, 柱温设为 23 °C.

1.4 数据处理

所有数据用 SPSS 17.0 进行单因素方差分析.

2 结果与分析

2.1 保水剂对干旱胁迫下膜脂过氧化作用的影响

由图 1 可见, A 类保水剂干旱胁迫组的 MDA 含量均显著上升($P < 0.05$), 其中 N + D 和 Na + D 组是其供水对照组的 3 倍多. 其次, K 和 X 供水和干旱处理组的 MDA 含量均低于 N 和 Na 组对应处理组. O_2^- 在 Na 组含量最高, 分别是 N、K、X 组的 2.33、4.03、2.87 倍; 干旱处理时, Na + D 组中 O_2^- 含量仍最高, 分别是 N + D、K + D、X + D 组的 1.79、3.14、2.83 倍, 但 Na 与 N + D 组无差异(图 1). H_2O_2 含量在 Na 组与 N、K、X 组之间达到了显著差异水平($P < 0.05$), 而 N、K、X 组之间没有显著性差异; N + D 组与 Na + D、K + D 和 X + D 组之间, Na + D 与 K + D 和 X + D 组之间均达到显著差异水平($P < 0.05$). 干旱胁迫下, K 和 X 组 H_2O_2 的含量均不受影响.

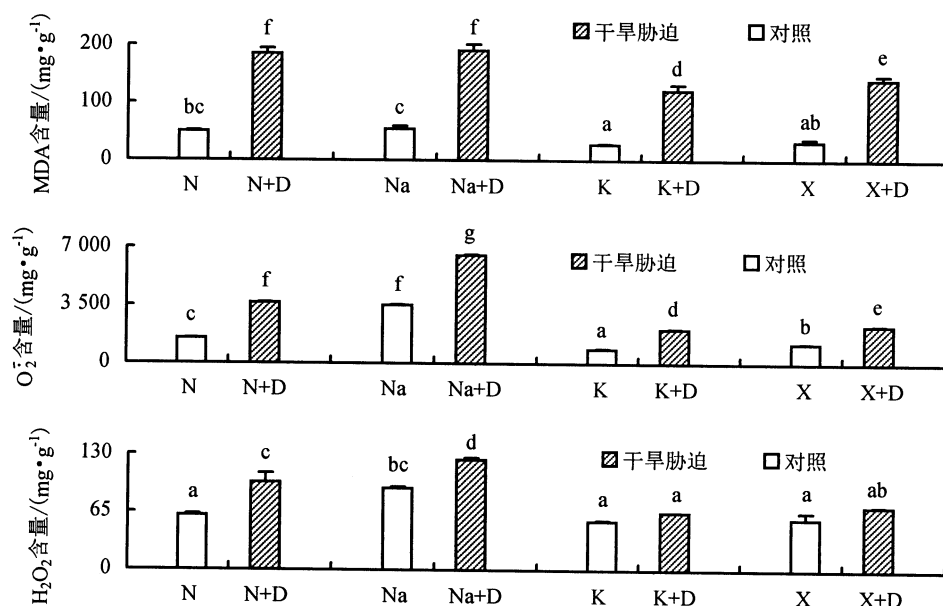
2.2 干旱胁迫下 3 种保水剂对 4 种抗氧化酶活性的影响

由图 2 可见, 干旱处理各组 CAT、POD、SOD 和 APX 4 种酶的活性均显著高于对照组, K 和 K + D 组的 SOD 含量除外. 其中 CAT、POD 和 SOD 活性较高, N + D 和 Na + D 组显著高于 K + D 和 X + D 组($P < 0.05$), 干旱胁迫下 4 种抗氧化酶活性在 N + D 和 Na + D 组较高, 且 POD 的活性尤其高, 在 N + D 和 Na + D 组中分别高达 1 428.5 和 1 744.2 U \cdot g⁻¹, 在 K + D 和 X + D 组也高达 1 000 U \cdot g⁻¹. 抗氧化酶在植物中起清除膜脂过氧化作用产生的自由基的作用. 在干旱胁迫下, 抗氧化酶活性均有不同程度的提高, 说明紫油厚朴在干旱胁迫下启动了自身的应急反应体系, 来抵抗干旱引起的自由基的积累, 减少对自身的伤害. 试验结果表明, 干旱胁迫下, 各组中酶活性均有不同程度的提高, 起到了调节作用.

2.3 干旱胁迫下保水剂对渗透调节物质的影响

由图 3 可见, 可溶性蛋白和脯氨酸含量在对照及钠盐型保水剂组中较高, 且 N 和 Na 组分别与 K 和 X 组、N + D 和 Na + D 组分别与 K + D 和 X + D 组达到显著差异水平($P < 0.05$). 无论厚朴幼苗是否受到干旱胁迫, 可溶性糖的含量在钾盐型保水剂组中的含量始终最高, 且 K 和 K + D 组分别与其它对应的各组之间具有显著差异($P < 0.05$), 这可能是由于钾离子有利于叶绿素的合成, 增强了钾盐型保水剂组中厚朴幼苗的光合作用效率, 使其可溶性糖的含量高. 但干旱胁迫组中可溶性糖含量整体高于对照组. 由此说明, 适

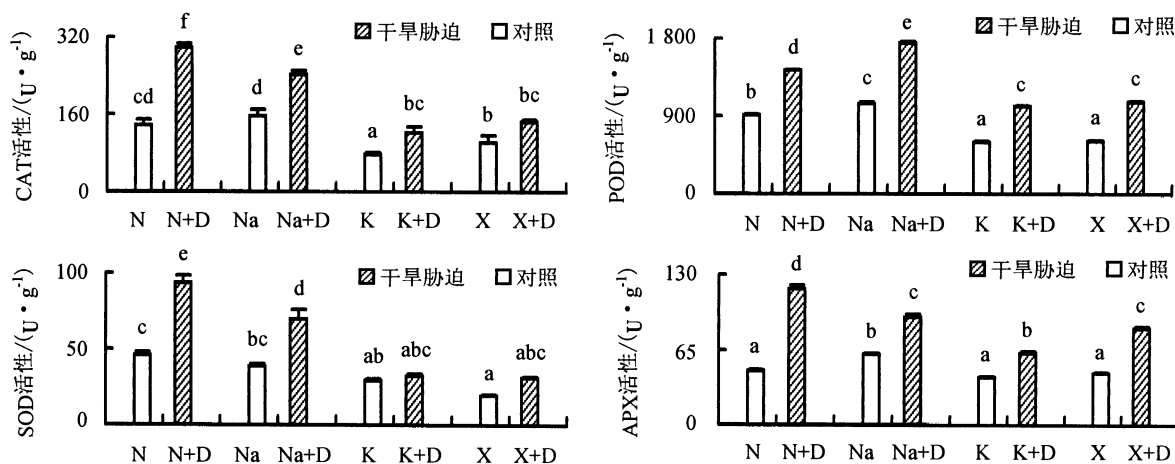
度的干旱胁迫有利于厚朴中可溶性蛋白、脯氨酸等渗透调节类物质的积累,降低植物体内外的渗透压差,从而减少水分从植物体内散失,增强其抗旱性。



图中不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 1 干旱胁迫下 3 种保水剂对紫油厚朴叶片中 MDA, O₂⁻, H₂O₂ 的影响

Fig. 1 Effects of 3 types of SAPs on MDA, O₂⁻, H₂O₂ levels in *M. officinalis* leaves under drought stress



图中不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图 2 干旱胁迫下 3 种保水剂对紫油厚朴叶片中 4 种抗氧化酶活性的影响

Fig. 2 Effects of 3 types of SAPs on antioxidant enzyme activities of *M. officinalis* leaves under drought stress

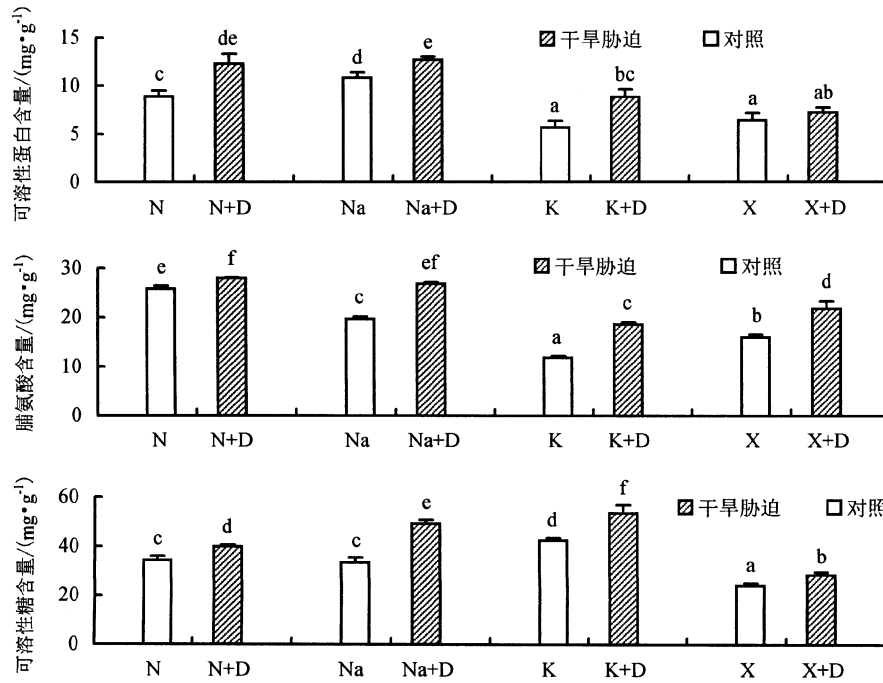
2.4 干旱胁迫下保水剂对厚朴酚与和厚朴酚含量的影响

由图 4 可见,幼苗树皮中厚朴酚与和厚朴酚的含量在干旱胁迫时明显上升。厚朴酚在 N 与 N + D 组、K 与 K + D 组中分别出现显著差异 ($P < 0.05$); 而和厚朴酚在除了钠盐型保水剂组外的其他 3 组中分别达到显著差异水平 ($P < 0.05$), 且在未干旱胁迫条件下, 各组中和厚朴酚的含量也有明显的差别, K 组中和厚朴酚的含量最高。在干旱胁迫下, K + D 组中和厚朴酚的含量比 K 组增加了 0.75 倍, 是 N + D 组的 1.41 倍; N + D 比 N 组增加了 0.4 倍, X + D 比 X 组增加了 0.31 倍, 而 Na 组只增加了 0.04 倍。通过比较发现, 钾盐型保水剂处理中二者的积累量均较高, 说明适度的 K⁺ 和干旱更利于厚朴酚与和厚朴酚的积累。

3 结论与讨论

综上所述, 本试验厚朴幼苗的各项生理指标在钾盐型和多功能型保水剂组中均表现良好, 说明当幼苗

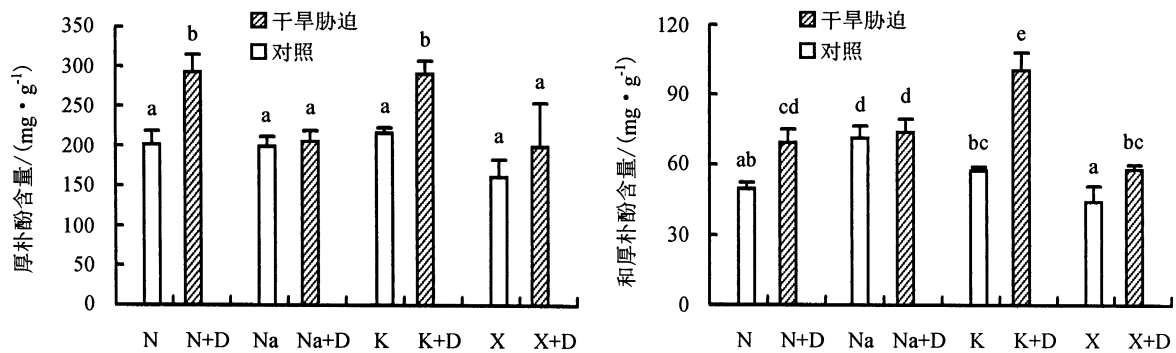
受到干旱胁迫时,这两种保水剂在一定程度上起到缓解作用,延长了厚朴正常生长发育的时间,这与 Shi et al^[32]的研究结果一致.钠盐型保水剂中某些指标如 MDA、O₂⁻、H₂O₂,甚至比干旱对照组的数值更高,说明钠盐型受到更严重的干旱胁迫.一方面说明干旱胁迫和 Na⁺是阻碍厚朴幼苗正常生长的因素,厚朴可能不适合在严重缺水和 Na⁺含量高的土壤环境中生存;另一方面,钠盐型保水剂组中某些生理指标偏高,可能由于厚朴幼苗受到水分和 Na⁺的双重胁迫所致,由此证明钠盐型保水剂组中 Na⁺的胁迫作用已超过其作为保水剂的作用.



图中不同字母表示差异显著 (P < 0.05) .

图 3 干旱胁迫下 3 种不同保水剂对紫油厚朴叶片中渗透调节物质的影响

Fig. 3 Effect of 3 types of SAPs on osmo regulation substances in *M. officinalis* leaves under drought stress



图中不同字母表示差异显著 (P < 0.05) .

图 4 干旱胁迫下 3 种不同保水剂对紫油厚朴树皮中厚朴酚及和厚朴酚含量的影响

Fig. 4 Effect of 3 types of SAPs on magnolol and honokiol levels in *M. officinalis* bark under drought stress

在干旱胁迫下 4 种抗氧化酶的活性、脯氨酸、可溶性糖和游离脯氨酸的含量均呈上升趋势,与前人^[33-35]的研究结果一致.且 4 种酶中 POD 的活性高,尤其在钠盐型保水剂组中高达 1 744.2 U·g⁻¹.植物性酶因较高的生物活性且对环境友好,是传统化学物理方法为主的农残检测的良好替代物^[36-37].因此厚朴的叶片也可以作为植物酶的来源之一,但其结构及理化特性还未见报道,若要开发利用需对其结构及理化性质进行深入研究.

通过 HPLC 对厚朴酚与和厚朴酚的分析可知二者在钾盐型保水剂组中积累量较高,尤其是和厚朴酚,

且二者的结果比较一致,二者可能存在类似的生物合成途径,但合成机理需进一步地深入研究. Aninbon et al^[38]的研究发现干旱胁迫下酚类成分在植物叶片和茎中的含量会增加,这与本研究中厚朴酚与和厚朴酚在干旱胁迫组中含量高的结果一致. Nichols et al^[39]的研究结果显示酚类物质的积累有助于提高种间杂交白车轴草的抗旱性. 但本试验厚朴幼苗的抗旱性可能是保水剂或酚类物质共同作用的结果,具体原因需进一步试验证明.

干旱是阻碍农林发展的重要环境影响因子之一. 现已证实植物抗旱性是多个基因共同控制的综合性状,难以确定主效基因,且不同种类植物的抗性基因存在着差异,因此通过分子技术改善植物抗旱性仍面临着巨大的挑战^[40-41]. 保水剂通过改善土壤理化性质为植物提供利于生长的微环境,同时适度干旱有利于次生代谢产物的积累,如紫油厚朴中厚朴酚与和厚朴酚的积累. 基于本试验结果,可考虑推广紫油厚朴种植,防风固沙的同时收获厚朴中药材,具有广阔的发展前景和巨大的经济开发价值.

参考文献

- [1] 孟娟,金青,刘晓伟. 药用淀粉接枝丙烯酸系超强吸水剂的研究[J]. 西北药学杂志, 2011, 26(2): 134-137.
- [2] LIANG R, YUAN H B, XI G X, et al. Synthesis of wheat straw-g-poly (acrylic acid) superabsorbent composites and release of urea from it[J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 77: 181-187.
- [3] ZHOU Y M, FU S Y, ZHANG L L, et al. Superabsorbent nanocomposite super absorbent polymers made of carboxylated cellulose nanofibrils and CMC-g-p (AA-co-AM) [J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 97: 429-435.
- [4] 吴春灵,温国华,丁奇,等. 含N、K的羧甲基纤维素类吸水剂的制备及性能研究[J]. 胶体与聚合物, 2010, 28(2): 72-74.
- [5] ZHANG Y, WU F, LIU L, et al. Synthesis and urea sustained-release behavior of an eco-friendly superabsorbent based on flax yarn wastes[J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 91: 277-283.
- [6] 陈瑞环,王萍,刘云,等. 耐盐保水剂的合成及其性能[J]. 化工进展, 2015, 34(6): 1750-1755.
- [7] 牛育华,赵冬冬,魏恩志,等. PEG/PVA/PAA 复合高吸水性树脂的制备及其保水性能[J]. 精细化工, 2016, 33(6): 628-634.
- [8] 罗惠文,杨清兴,罗永松. 农林保水剂在油茶培育中应用效果的初步观测[J]. 绿色科技, 2012(1): 83-84.
- [9] 刘方春,马海林,马丙尧,等. 容器基质育苗中保水剂对白蜡生长及养分和干物质积累的影响[J]. 林业科学, 2011, 47(9): 62-67.
- [10] 盛玮,池文泽. 保水剂对棉花光合作用特性的影响[J]. 棉花科学, 2011, 33(6): 20-23.
- [11] 李倩,刘景辉,张磊,等. 保水剂不同用法下马铃薯形态特征、渗透调节物质及产量的变化[J]. 西北农业科学, 2011, 20(10): 58-63.
- [12] 许俊香,李吉进,孙钦平,等. 聚丙烯酰胺型保水剂对西瓜产量和品质的影响[J]. 农学学报, 2011: 34-37.
- [13] 郭陞垚,陈永水,陈剑洪,等. 花生施用多功能保水剂试验初报[J]. 广东农业科学, 2011, 20: 55-56.
- [14] 陈存及,陈伙法. 阔叶树种栽培[M]. 北京: 中国林业出版社, 2000: 382-384.
- [15] 斯金平,童再康. 厚朴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 1.
- [16] TAE Y S, DAE K K, BYEONG S C, et al. Antiallergic action of *Magnolia officinalis* on immediate hypersensitivity reaction [J]. Arch Pharm Res, 2001, 24(3): 249-255.
- [17] QIANG L Q, WANG C P, WANG F M, et al. Combined administration of the mixture of honokiol and magnolol and ginger oil evokes antidepressant-like synergism in rats [J]. Archives of Pharmacological Research, 2009, 32(9): 1281-1292.
- [18] YI L T, ZHANG L, DING A W, et al. Orthogonal array design for antidepressant compatibility of polysaccharides from banxia-houpu decoction, a traditional Chinese herb prescription in the mouse models of depression [J]. Archives of Pharmacological Research, 2009, 32(10): 1417-1423.
- [19] LEE Y K, YUK D Y, KIM T I, et al. Protective effect of the ethanol extract of *Magnolia officinalis* and 4-O-methylhonokiol on scopolamine-induced memory impairment and the inhibition of acetylcholinesterase activity [J]. J Nat Med, 2009, 63: 274-282.
- [20] PYO M K, LEE Y Y, YUN-CHOI H S, et al. Anti-platelet effect of the constituents isolated from the barks and fruits of *Magnolia obovate* [J]. Arch Pharm Res, 2002, 25(3): 325-328.
- [21] 刘可云,黄贤珍. 厚朴酚对大鼠局灶性脑缺血/再灌注神经元凋亡及 bcl-2、Bax 蛋白表达的影响[J]. 湖北民族学院学报(医学版), 2005, 22(3): 15-17.

- [22] 冯佩杰. 都江堰厚朴 HPLC 色谱条件优化及其酚含量动态分布的研究[D]. 重庆: 西南交通大学 2008.
- [23] 张根. 和厚朴酚对自发性高血压大鼠的降压作用及机制研究[D]. 广州: 广州中医药大学 2009.
- [24] 侯迷红, 范富, 宋桂云, 等. 不同配方营养液对三种叶菜产量和品质的影响[J]. 内蒙古民族大学学报(自然科学版), 2011, 26(5): 541-544.
- [25] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社 2008: 78-121.
- [26] 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: 86-180.
- [27] 武芸, 郑小江, 卜贵军, 等. 响应面分析法优化海金沙草多糖的提取工艺[J]. 食品科学 2010, 31(18): 109-111.
- [28] WANG A G, LUO G H. Quantitative relation between the reaction of hydroxylamine and superoxide anion radicals in plants [J]. Plant Physiology Communications, 1990(6): 55-57.
- [29] 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 2009: 221-222.
- [30] 姜宁, 刘晓鹏, 田心鹏, 等. 微波辅助提取厚朴叶中厚朴酚及和厚朴酚的研究[J]. 科技园地 2007(9): 8-10.
- [31] 刘晓鹏, 姜宁. 超声波辅助提取厚朴叶中厚朴酚及和厚朴酚的研究[J]. 时珍国医国药 2008, 19(2): 278-280.
- [32] SHI Y, LI J, SHAO J et al. Effects of StoNosorb and Luquasorb polymers on salt and drought tolerance of *Populus popularis* [J]. Scientia Horticulturae, 2010, 124: 268-273.
- [33] 赵莉, 牟书勇, 张鲜花. 干旱胁迫下新疆野生鸭茅(*Dactylis glomerata*) 苗期抗旱性生理特性[J]. 干旱区研究 2015, 32(5): 953-957.
- [34] 裴斌, 张光灿, 张淑勇, 等. 土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响[J]. 生态学报 2013, 33(5): 1386-1396.
- [35] 李永洁, 李进, 徐萍, 等. 黑果枸杞幼苗对干旱胁迫的生理影响[J]. 干旱区研究 2014, 31(4): 756-762.
- [36] 郭玉婷, 王剑文, 孙晓飞, 等. 药用活性成分的植物酶生物转化[J]. 中草药 2006, 37(12): 1890-1894.
- [37] 钟树明, 袁东星, 金晓英, 等. 植物酶抑制技术用于检测蔬菜中有机磷及氨基甲酸酯类农药残留[J]. 环境化学 2002, 21(2): 189-193.
- [38] ANINBON C, JOGLOY S, VORASOOT N, et al. Effect of end of season water deficit on phenolic compounds in peanut genotypes with different levels of resistance to drought [J]. Food Chemistry, 2016, 196: 123-129.
- [39] NICHOLS S N, HOFMANN R W, WILLIAMS W M. Physiological drought resistance and accumulation of leaf phenolics in white clover interspecific hybrids [J]. Environmental and Experimental Botany, 2015, 119: 40-47.
- [40] AYAZ M, AHMAD R, SHAHZAD M, et al. Drought stress stunt tomato plant growth and up-regulate expression of SIAREB, SINCED3, and SIERF024 genes [J]. Scientia Horticulturae, 2015, 195: 48-55.
- [41] LI W W, CHEN M, ZHONG L, et al. Overexpression of the autophagy-related gene *SiATG8a* from foxtail millet (*Setaria italica* L.) confers tolerance to both nitrogen starvation and drought stress in *Arabidopsis* [J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2015, 468(4): 800-806.

(责任编辑: 苏靖涵 林国栋)