

DOI:10.13718/j.cnki.xsxb.2022.02.009

外源性植物激素对盐肤木叶片次生代谢产物及其抗氧化活性的影响^①

胡克特^{1,2}, 张萍¹, 陈荣祥^{1,3}, 李林¹, 顾丁¹

1. 遵义医科大学基础医学院, 贵州 遵义 563000;

2. 遵义市附属第三医院核医学科, 贵州 遵义 563000;

3. 遵义市理化分析测试工程技术研究中心, 贵州 遵义 563000

摘要: 探究了外源性植物激素生长素 3-吲哚乙酸(IAA)、细胞分裂素 6-苄氨基嘌呤(6-BA)和赤霉素(GA₃)对盐肤木(*Rhus chinensis*)叶片酚酸质量分数的影响. 以 5 年生以上盐肤木为实验材料, 采用不同浓度的 IAA, 6-BA 和 GA₃ 及其相同浓度的混合液对盐肤木叶片进行处理, 每隔 5 d 采集并测定 1 次盐肤木叶片的酚酸质量分数, 以乙醇溶液为对照. 结果表明: IAA, 6-BA, GA₃ 单种激素对盐肤木叶片酚酸质量分数有明显的提高, 3 种激素单独喷施后, 多酚最高增长率分别出现在第 15, 10, 15 d, 与对照相比, 分别增加了 46.54%, 48.48%, 70.58%; 混合激素 IAA+GA₃, IAA+6-BA, 6-BA+GA₃, IAA+6-BA+GA₃ 喷施后, 多酚最高增长率分别出现在第 10, 10, 10 和 15 d, 与对照相比, 分别增加了 42.27%, 52.73%, 33.07% 和 74.37%. 这表明, 在本实验条件下, IAA, 6-BA, GA₃ 单种激素提高盐肤木叶片多酚质量分数的最适宜浓度分别为 50, 30, 30 mg/L, 与单独喷施相比, 这 3 种激素混合喷施对提高盐肤木叶片多酚质量分数的效果更好; 抗氧化分析也表明 3 种激素混合喷施组抗氧化性高于对照组; 超高效液相色谱表明外源性植物激素主要通过增加根皮苷与没食子酸质量分数提高盐肤木叶片的抗氧化性.

关键词: 植物激素; 盐肤木; 多酚

中图分类号: S718.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2022)02-0043-07

Effect of Exogenous Plant Hormones on Content of Secondary Metabolites in the Leaves of *Rhus Chinensis* and on Their Antioxidant Activities

HU Kete^{1,2}, ZHANG Ping¹,CHEN Rongxiang^{1,3}, LI Lin¹, GU Ding¹

1. School of Basic Medical Sciences, Zunyi Medical University, Zunyi, Guizhou 563000, China;

2. Nuclear Medicine of The Third Affiliated Hospital of Zunyi Medical University, Zunyi, Guizhou 563000, China;

3. Zunyi Engineering Technology Research Center of Physical and Chemical Analysis, Zunyi, Guizhou 563000, China

Abstract: The effect of exogenous plant hormones auxin 3-indoleacetic acid (IAA), cytokinin 6-benzylaminopurine (6-BA), gibberellic acid (GA₃) and their mixtures on content of polyphenols in leaves of *Rhus chinensis*

^① 收稿日期: 2020-12-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(31660131); 贵州省联合基金项目(黔科合 J 字 LKZ[2013]17 号); 遵义医学院博士启动基金项目(F-568).

作者简介: 胡克特, 硕士, 主要从事药用植物开发和利用的研究.

通信作者: 顾丁, 硕士研究生导师, 副教授.

was investigated. Ethanol solution was used as the blank control. The leaves were collected by every 5 days and their contents of total phenols were measured. The results show that IAA, 6-BA and GA₃ increased significantly the total phenol content in leaves of *R. chinensis* at concentrations of 50, 30 and 30 mg/L, respectively. The highest accumulation of total phenols of *R. chinensis* leaves separately sprayed IAA, 6-BA, and GA₃ appeared on 15th, 10th and 15th day, respectively, which increased by 46.54%, 48.48%, and 70.58%, respectively, compared with the control group. Moreover, when leaves were sprayed by IAA+GA₃, IAA+6-BA, 6-BA+GA₃, and IAA+6-BA+GA₃, their highest growth rate of total phenol content occurred on 10th, 10th, 10th and 15th day and increased by 42.27%, 52.73%, 33.07% and 74.37%, respectively, compared with the control group. These results suggest that the optimal concentrations of IAA, 6-BA and GA₃ for increasing the total phenol content of *R. chinensis* leaves were 50, 30 and 30 mg/L respectively. Compared with being sprayed by single hormone, *R. chinensis* leaves sprayed by the hormones' mixtures had higher total phenol content. The result of antioxidant analysis also show that the antioxidant activity of the leaves sprayed by the hormones' mixtures is higher than that of the control group. All these results indicate that exogenous plant hormones can effectively increase the content of total phenols in the leaves of *R. chinensis*, Ultrahigh performance liquid chromatography (HPLC) showed that exogenous phytohormones could improve leaves of *R. chinensis* antioxidant properties mainly by increasing the content of rhizosperidin and gallic acid.

Key words: plant hormone; *Rhus chinensis*; phenolic compounds

盐肤木(*Rhus chinensis* Mills)为漆树科盐肤木属落叶小乔木,是我国重要的林业经济植物^[1],其茎和根常用于制作中药^[2-3],我国重要的中药材五倍子也是由瘿绵蚜科某些昆虫寄生于其中几种植物复叶上而形成的瘿瘤^[4].五倍子所含酚酸类物质是一种具有诸多用途的天然产物,常被用作医疗与水产渔业^[5-7],具有抗氧化、抗辐射、抗肿瘤等生物活性^[8-10],其中主要成分没食子酸具有改善脑缺血再灌注损伤,改善心衰引起的心功能障碍和纤维化的功效^[11-12].然而,目前五倍子酚酸获取途径比较单一,即主要是用五倍子提取.近年来,由于自然环境遭到破坏而导致自然生长的虫瘿越来越少,从而使五倍子的产量越发降低,进而无法满足市场的需求^[13].较五倍子而言,盐肤木叶片则相对资源丰富且易于获得,因其中也含有一定量的五倍子酚类化合物^[14-16]而具有较大的潜在价值.随着对植物虫瘿的研究,发现虫瘿的形成与植物激素有关^[17],前期研究发现五倍子与盐肤木中内源植物激素存在显著差异,并有研究发现喷施赤霉素(GA₃)能够使五倍子体积增大^[18],那么能否通过喷施外源性植物激素直接提高盐肤木叶片的多酚质量分数呢?通常酚类化合物的质量分数在五倍子(含倍花)中是盐肤木叶片的5~13倍^[19],倘若喷施外源性植物激素能提高盐肤木叶片的没食子酸等质量分数,即可从叶片中提取其有用化合物,从而使多酚的获取摆脱对倍蚜和五倍子的依赖,进而促进我国酚酸化合物相关产业的发展.此外,还将为植物酚类代谢的相关研究提供参考.为此,笔者初步研究了外源性植物激素对盐肤木叶片次生代谢产物积累的影响,以期寻求一条替代从五倍子中获取酚酸的途径,并探究其抗氧化活性改变的情况,以及外源性植物激素主要调控何种盐肤木次生代谢产物而影响其抗氧化性,以期发现其更多的应用价值.

1 材料与方法

1.1 主要仪器与试剂

紫外可见分光光度仪(Lambda265),铂金埃尔默仪器有限公司;电热鼓风干燥箱(GZX-9070MBE),上海博讯实业有限公司医疗设备厂;超高效液相色谱仪(UltiMate 3000 Bio—RS型),赛默飞世尔科技有限公司;万分之一电子天平(ME104/2),梅特勒-托利多;纯水及超纯水系统(Chorus),英国埃尔格.

无水乙醇(95%),成都市科隆化学品有限公司;福林酚,飞净生物科技有限公司;生长素 3-吲哚乙酸(IAA, CAS: 87-51-4, 纯度≥98%),细胞分裂素 N-6-苄基腺嘌呤(BA, CAS: 12-14-39-7, 纯度≥98%),赤霉素(GA₃, CAS: 77-06-5, 纯度≥90%),北京绿泽森生物技术有限公司;甲醇、乙腈、柠檬酸(色谱纯)、

没食子酸标准品、无水碳酸钠、DPPH 自由基、ABTS 二铵盐、过硫酸钾,阿拉丁生化科技股份有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 植物材料及其处理

采用完全随机实验设计,使用 IAA,6-BA,GA₃ 3 种激素处理盐肤木叶片,每种激素处理设置 3 个浓度梯度 10,30,50 mg/L,再以混合激素处理设置同一浓度,即采用植物激素 IAA,6-BA,GA₃,其浓度为 IAA 50 mg/L+6-BA 10 mg/L,IAA 50 mg/L+GA₃ 10 mg/L,6-BA 10 mg/L+GA₃ 10 mg/L,IAA 50 mg/L+6-BA 10 mg/L+GA₃ 10 mg/L;以乙醇溶液处理为对照(CK)共计 14 个处理。先将植物激素溶解于 95%的无水乙醇中,再用蒸馏水分别稀释至所需浓度,其中酒精浓度为 5%。

2020 年 6 月 23 日 9:00(天气晴),使用各处理溶液各 100 mL 喷施叶片,共喷施 5 d,单次组合共计喷施 500 mL,在第 6 d 采集叶片,之后每隔 5 d 采集 1 次叶片,共采集 4 次,采集时间为早上 9:00,采集完毕立即带回实验室 105 °C 杀青备用,然后于 60 °C 烘干。

1.2.2 多酚提取

精确称取 0.1 g 盐肤木叶片粉末,采用 80%甲醇溶液超声提取多酚。提取条件:料液比为 1:100(g/mL),在 16 °C 水中超声提取 50 min,冷却,取 1 mL 于 EP 管中在 12 000 r/min 离心 10 min,取上清,然后 0.22 μm 滤膜过滤。

1.2.3 多酚测定

提取方法参照 1.2.2,然后稀释 10 倍,采用福林法^[20],取样品液 0.5 mL,加入 0.25 mol/L 福林酚试剂 0.5 mL,混合静置 3 min,加入 15% Na₂CO₃ 1 mL 混合静置 30 min,12 000 r/min,离心 10 min,取上清,以未加样品的对照组为空白,测定 760 nm 处的吸光度,建立没食子酸标准曲线,将吸光度带入公式计算没食子酸标准品浓度:

$$Y=17.611X+0.002$$

式中, Y 为吸光度, X 为没食子酸标准品浓度。

1.2.4 抗氧化性对比

酚类物质是盐肤木叶片中主要的抗氧化成分,而多酚浓度与抗氧化性存在正相关,故将总酚相对质量分数最多组设为 A 组,空白组设为 B 组,使用 3 种抗氧化性实验比较其抗氧化活性是否存在显著差异,并以此探究其多酚质量分数是否真正发生改变。

1.2.4.1 对 DPPH 自由基的清除

参考文献[21],取 DPPH 1 mg,与有机溶剂定容至 25 mL,混合震荡可得浓度为 0.04 mg/mL 的母液。取 2 mL 母液,设置浓度梯度加入样品液并补加有机溶剂定容至 1 mL,室温反应 30 min,于 517 nm 处测定吸光度(A),空白以 1 mL 有机溶剂代替样品液,计算清除率(I):

$$I/\%=(1-A_{\text{试样}}/A_{\text{空白}})\times 100\%$$

式中, $A_{\text{试样}}$ 为样品液的吸光度值, $A_{\text{空白}}$ 为空白组的吸光度值。

1.2.4.2 对 ABTS 自由基的清除

参考文献[22],取 ABTS 二铵盐 3 mg 溶于 0.8 mL 双蒸水与 1 mg 过硫酸钾溶于 1.5 mL 蒸馏水中,暗反应氧化 12 h,稀释 30 倍可得母液,取母液 2 mL,与设置好浓度梯度的样品液 1 mL 暗反应 30 min,于 734 nm 处测定吸光度,空白以 1 mL 有机溶剂代替样品,计算清除率(I)。

1.2.4.3 铁还原能力

参考文献[23],以多酚浓度为 x 轴,吸光度为 y 轴,在 593 nm 处测定吸光度,比较不同处理盐肤木叶片的多酚铁还原能力。

1.2.5 对 A 组和 B 组进行多酚及类黄酮测定

采用色谱柱: ACQUITY UPLC HSS T3 柱(2.1 mm × 100 mm, 1.8 μm);流动相条件: 50 mmol/L 柠檬酸盐溶液(pH 值为 2.9)与甲醇,按以下梯度洗脱: 0~14.5 min, 10%~35%柠檬酸盐溶液;之后采用 40%柠檬酸盐冲洗 2 min 后回到初始梯度并平衡 4 min,柱温 30 °C,进样体积 1 μL, DAD 检测波长为 275 nm。

1.2.6 数据处理与分析

采用 Excel 2003, SPSS 17.0 软件进行数据统计与分析, prism 8 软件作图,每次测量均重复 3 次。

2 结果与分析

2.1 标准曲线绘制

根据不同没食子酸标准品浓度下, 对应吸光度的测定结果绘制标准曲线如图 1, 线性回归方程为 $Y = 17.611X + 0.002$, $R^2 = 0.9997$, 其中 Y 为吸光度, X 为没食子酸标准品浓度。

2.2 喷施不同植物激素对盐肤木叶片多酚的影响

不同种类及浓度激素处理后盐肤木多酚质量分数结果见图 2. 由图 2d 中可知, 与对照组相比, 3 种激素混合组显著提高了叶中多酚的质量分数 ($p < 0.05$), 见效较快. 计算得出在处理 15 d 时出现了最大增长率, 持续时间长, 在喷施后 10~15 d 都有不错的效果, 其余促进效果依次为 IAA+6-BA, IAA+GA₃, GA₃+6-BA, 其中 GA₃+6-BA 组合在 5 d 内为抑制, 5 d 后为促进。

图 2a 中, 高浓度 IAA (50 mg/L) 显著提高了叶中多酚的质量分数 ($p < 0.05$), 见效较快; 随着 IAA 浓度增高, 多酚质量分数随着增高, 在 15 d 时增长最显著 ($p < 0.05$), 在第 20 d, 10 mg/L 和 30 mg/L 与对照相比差异无统计学意义 ($p > 0.05$).

图 2b 中, 中等浓度 6-BA (30 mg/L) 显著提高了叶中多酚的质量分数 ($p < 0.05$), 见效快; 在处理第 10 d 时增长达到极值, 10 mg/L 组和 50 mg/L 组在 5 d 时与对照差异无统计学意义 ($p > 0.05$). 在 10 d 时多酚质量分数提高, 其中 10 mg/L 组持续时间较长, 在 10~15 d 均有不错的效果. 在第 20 d, 3 种浓度梯度与对照差异无统计学意义 ($p > 0.05$).

图 2c 中, 中等浓度 GA₃ (30 mg/L) 显著提高了叶中多酚的质量分数 ($p < 0.05$), 见效较快; 在 15 d 时增长达到峰值, 仅在第 10 d 效果不如 50 mg/L 组, 3 种浓度均有较好的促进盐肤木叶中多酚质量分数的效果。

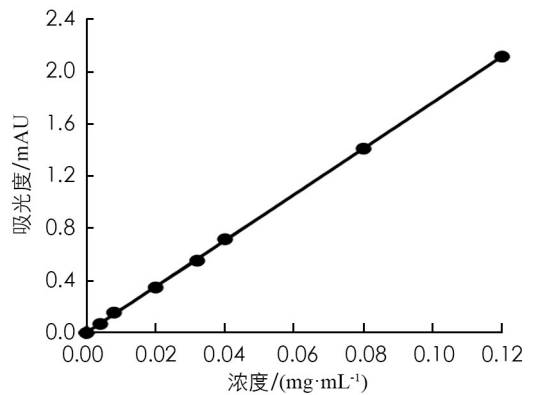
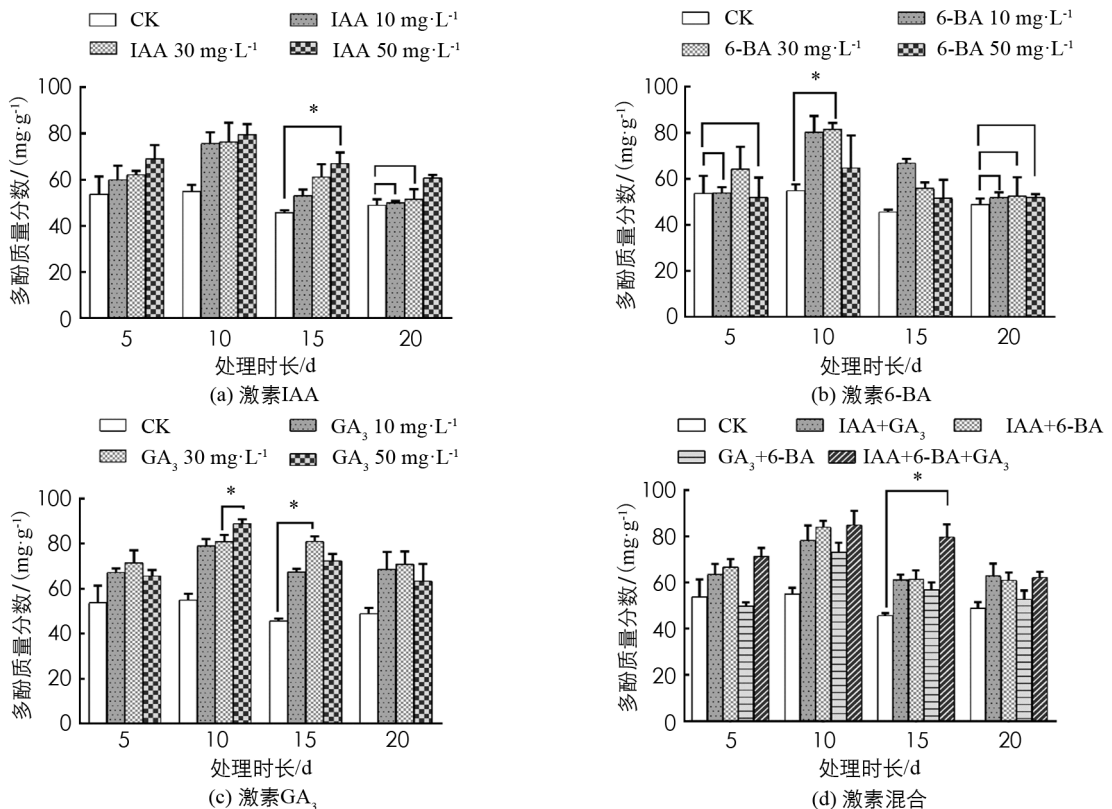


图 1 没食子酸标准曲线



* 表示 $p < 0.05$, 差异有统计学意义。

图 2 不同情况下植物激素喷施后酚酸质量分数

2.3 抗氧化分析比较

由 2.2 结论选择第 15 d 全喷组为 A, 第 15 d 对照组为 B 进行抗氧化分析和比较。

2.3.1 DPPH 自由基清除能力

由图 3 可以看出, 盐肤木叶质量浓度在 20~120 mg/L 时与 DPPH 自由基清除率成正相关, IC_{50} 表示半清除率, 即 A 组 IC_{50} 为 49.70 mg/L, B 组 IC_{50} 为 79.90 mg/L, A 组 DPPH 清除率明显高于 B 组, 即可推测 A 组多酚质量分数高于 B 组。

2.3.2 ABTS 自由基清除能力

由图 4 可以看出, 盐肤木粉末质量浓度在 2~12 mg/L 时与 ABTS 自由基清除率成正相关, A 组 IC_{50} 为 2.15 mg/L, B 组 IC_{50} 为 4.77 mg/L, 可以推测 A 组多酚质量分数高于 B 组。

2.3.3 铁离子还原能力

FRAP 法的原理是抗氧化剂将 Fe^{3+} 还原成 Fe^{2+} , 其与 FRAP 试剂结合, 在 593 nm 处具有最大吸收峰, 吸光度越大, 铁离子还原性越好。由图 5 可以看出, 多酚质量浓度在 20~100 mg/L 之间与铁离子还原能力成正相关, 可以推测 A 组多酚质量分数高于 B 组。

3 次抗氧化实验均显示 A, B 两组具有显著的抗氧化性, A 组抗氧化能力显著高于 B 组, 可推测 A 组多酚质量分数高于 B 组, 与 2.2 结果相符。

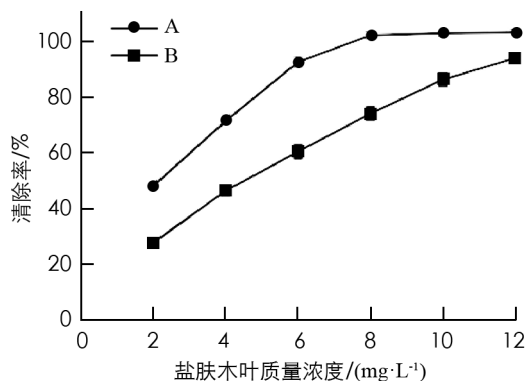


图 4 不同质量浓度对 ABTS 的清除作用

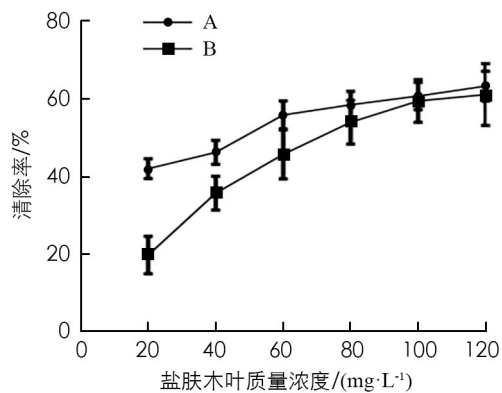


图 3 不同质量浓度对 DPPH 的清除作用

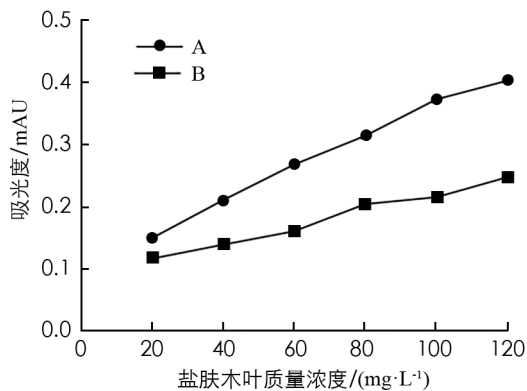


图 5 不同质量浓度对 Fe^{3+} 的还原能力

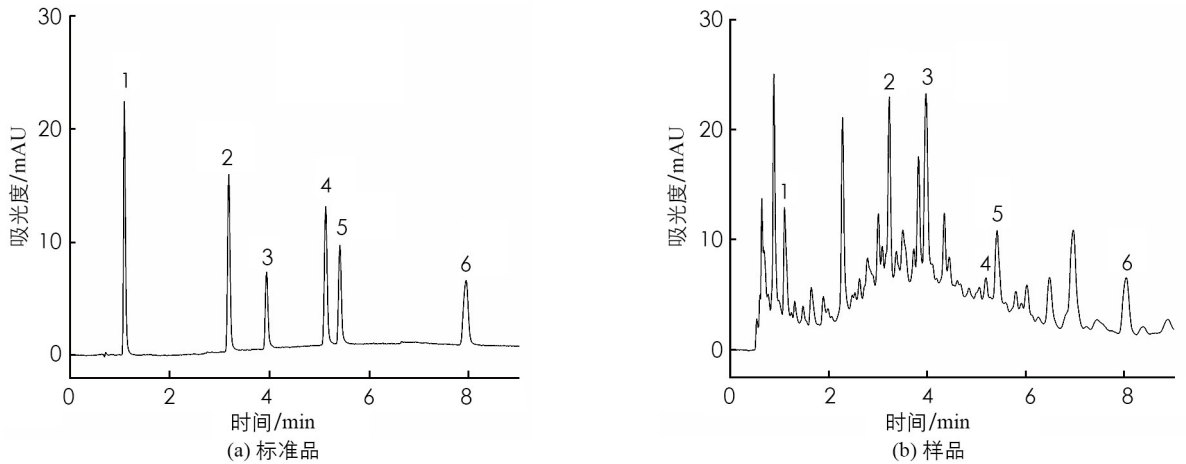
2.4 A, B 组的主要次生代谢产物质量分数测定及分析

为探究植物激素促进了何种酚类化合物的合成, 并使盐肤木叶抗氧化性增强, 笔者采用超高效液相色谱对提取物进行检测, 结果见表 1, 分离出的盐肤木主要成分见图 6。

结果显示盐肤木叶中共检测出 6 种主要成分, 除没食子酸甲酯、没食子酸乙酯外, 其余成分均有显著增高, 其中根皮苷、没食子酸质量分数增高较为显著, 也即是指混合植物激素主要是通过提高根皮苷与没食子酸质量分数增加其抗氧化性, 而喷施混合植物激素对没食子酸甲酯和没食子酸乙酯的影响不大。

表 1 实验组与对照组盐肤木样品中化合物质量分数测定结果

成分	对照组/(mg·g ⁻¹)	实验组/(mg·g ⁻¹)	上调或下调
没食子酸	3.61±0.35	4.34±0.39	↑
没食子酸甲酯	1.05±0.05	1.16±0.17	—
表没食子儿茶素没食子酸酯	0.65±0.03	0.97±0.26	↑
没食子酸乙酯	0.08±0.01	0.08±0.03	—
表儿茶素没食子酸酯	0.23±0.04	0.36±0.05	↑
根皮苷	3.83±0.47	6.57±0.53	↑



1 为没食子酸; 2 为没食子酸甲酯; 3 为表没食子儿茶素没食子酸酯; 4 为没食子酸乙酯; 5 为表儿茶素没食子酸酯; 6 为根皮苷

图 6 标准品与样品色谱图

3 结论与讨论

本研究通过直接测量与间接比较表明, IAA, 6-BA, GA₃ 具有促进盐肤木酚类化合物积累的效果, 并且受到激素种类、激素浓度和处理时间等因素的影响. 在本实验条件下, IAA, 6-BA, GA₃ 的最适宜质量浓度分别为 50, 30, 30 mg/L; 相比对照组, 多酚最高增长率分别出现在第 15, 10, 15 d, 3 种激素混合能达到更好的效果, 其抗氧化性得到显著提高, 具有一定的应用意义.

不同植物激素之间的相互调节, 在植物生长发育中起着关键作用. IAA 的主要作用是促进细胞伸长、诱导和促进细胞分化^[24]. 本研究结果表明, 不同浓度的 IAA 均能够提高盐肤木叶的多酚质量分数, 其中高浓度的 IAA (50 mg/L) 是较适宜的浓度, 此浓度在喷施 5~20 d 均有不错的效果. 在使用 Qtrap 6500 质谱仪发现五倍子中的 IAA 是叶片中的 7.48 倍, 说明植物保持高水平的 IAA 有助于酚类物质的积累. 6-BA 属于人工合成细胞分裂素, 在次生代谢产物的合成和积累以及应激反应过程中发挥着重要的作用^[25]. 本实验结果表明中等质量浓度的 6-BA (30 mg/L) 是提高盐肤木叶多酚质量分数的适宜浓度, 在 5~15 d 的盐肤木多酚质量分数显著增高, 其中原因可能是中等浓度的 6-BA 溶液提高了叶片中细胞分裂素的水平, 抑制并清除了自由基, 增强了光合作用^[26]. 有研究表明 6-BA 有助于提高沙枣愈伤组织中缩合鞣质的积累^[27]. GA₃ 是能够加速细胞分裂与生长、促进植物生长、抑制植物器官衰老的植物生长调节剂^[28]. 本实验结果表明, 不同浓度的 GA₃ 各采样时间的盐肤木叶多酚质量分数均有不同程度的提升, 以 30 mg/L 效果最佳. GA₃ 已被证实是生长素运输所必须的激素^[29], 另有研究表明 GA₃ 能促进丹参毛状根中多酚的积累^[30], 并且 GA₃ 在其悬浮培养细胞中也能促进酚类化合物的形成^[31], 与本研究结果相符.

本研究通过直接测量多种植物激素刺激下盐肤木叶多酚质量分数并且通过 3 种抗氧化实验加以验证, 即喷施激素组酚类质量分数高于对照组, 表明适当的外源性植物激素有助于提高盐肤木叶片的次生代谢物质量分数, 其中没食子酸为五倍子中的主要成分, 这可能使“喷施外源性植物激素提高盐肤木叶片的酚类质量分数, 并直接从叶片中提取酚类化合物, 从而使酚类的获取摆脱对倍蚜和虫瘿的依赖”的设想得以实现, 进而有利于促进我国酚类化合物相关产业的发展; 同时, 还将为植物次生代谢及提高抗氧化性的相关研究提供新的思路. 进一步研究发现以根皮苷、没食子酸及其衍生物为首的类黄酮及多酚类化合物受植物激素影响变化较大. 在既往的研究中^[32-34], 根皮苷与没食子酸具有良好的抗氧化性及药用价值, 希望此研究能为类似研究提供参考. 本研究初步确定了对盐肤木叶片喷施外源性植物激素能提高酚类质量分数, 但后续还需在理论方面弄清植物激素与盐肤木叶片酚类积累之间的关系及其机制.

参考文献:

- [1] WANG G, WANG Y Z, YU Y, et al. Triterpenoids Extracted from *Rhus Chinensis* Mill Act Against Colorectal Cancer by Inhibiting Enzymes in Glycolysis and Glutaminolysis: Network Analysis and Experimental Validation [J]. Nutrition and Cancer, 2020, 72(2): 293-319.

- [2] ZHANG C T, MA Y L, ZHAO Y X, et al. Phenolic Composition, Antioxidant and Pancreatic Lipase Inhibitory Activities of Chinese Sumac (*Rhus Chinensis* Mill.) Fruits Extracted by Different Solvents and Interaction between Myricetin-3-O-Rhamnoside and Quercetin-3-O-Rhamnoside [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2018, 53(4): 1045-1053.
- [3] 石洪玥, 陆颖, 卢正义, 等. 不同盐度下5种中草药对2种水产动物致病菌的抑菌效果比较 [J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(1): 162-165.
- [4] 查玉平, 雷朝亮, 陈京元. 五倍子蚜与寄主树的互作研究进展 [J]. *应用昆虫学报*, 2019, 56(2): 195-201.
- [5] 耿娜娜, 吴明松, 郑翔, 等. 单宁酸协同顺铂增强肝癌 HepG2 细胞内质网应激 PERK-ATF4 通路的激活水平 [J]. *天然产物研究与开发*, 2018, 30(4): 653-658, 628.
- [6] 潘定举. 《本草纲目》中口腔黏膜局部用药初探 [J]. *中华中医药杂志*, 2018, 33(3): 1114-1116.
- [7] 郭海燕, 于丽娟, 王川, 等. 五倍子对中华倒刺鲃幼鱼血液生理生化指标的影响 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2016, 38(3): 42-48.
- [8] 卞雨晴, 马一丹, 代东跃, 等. 单宁酸的生物学特征及在医学和口腔医学领域的应用价值 [J]. *中国组织工程研究*, 2019, 23(2): 284-290.
- [9] 阮海华, 胡双艳, 张春晨, 等. 单宁酸通过选择性抑制表皮生长因子受体特定位点磷酸化抑制肿瘤细胞的增殖 [J]. *食品科学*, 2018, 39(5): 199-205.
- [10] 吴苏南. 单宁酸对血小板生成的影响及抗辐射作用研究 [D]. 重庆: 第三军医大学, 2015.
- [11] JIN L, SUN S M, RYU Y, et al. Gallic Acid Improves Cardiac Dysfunction and Fibrosis in Pressure Overload-Induced Heart Failure [J]. *Scientific Reports*, 2018(8): 9302.
- [12] 吴莹, 谭立伟, 梁晨, 等. 没食子酸改善脑缺血再灌注损伤大鼠的药效评价 [J]. *中药药理与临床*, 2018, 34(2): 28-32.
- [13] 祝友春, 桑子阳, 宋德应, 等. 角倍丰产栽培技术研究 [J]. *林业实用技术*, 2011(7): 46-48.
- [14] 叶永华, 杨玲, 徐伟, 等. 响应面法优化盐肤木总鞣质回流提取工艺 [J]. *中国药业*, 2019, 28(9): 9-13.
- [15] 叶森, 吴猷, 林小栩, 等. 采用改良磷钼钨酸-干酪素法测定闽产盐肤木根中总鞣质含量 [J]. *辽宁中医药大学学报*, 2019, 21(4): 77-79.
- [16] 孙婧, 王文静, 孟庆华, 等. 盐肤木总多酚萃取工艺优化及抗氧化性研究 [J]. *化学工程*, 2019, 47(5): 74-78.
- [17] TOOKER J F, HELMS A M. Phytohormone Dynamics Associated with Gall Insects, and Their Potential Role in the Evolution of the Gall-Inducing Habit [J]. *Journal of Chemical Ecology*, 2014, 40(7): 742-753.
- [18] 王海英. 内源激素调控角倍发育的分子机制 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017.
- [19] 林余霖, 程惠珍, 陈君. 五倍子及其寄主植物的单宁酸含量分析 [J]. *中国中药杂志*, 1997, 22: 16.
- [20] 蔺蓓蓓, 郑红星, 刘祥, 等. 天麻中总多酚的大孔树脂纯化工艺优化 [J]. *中国药房*, 2019, 30(14): 1965-1969.
- [21] SHARIFIFAR F, MOSHAFI M H, MANSOURI S H, et al. In Vitro Evaluation of Antibacterial and Antioxidant Activities of the Essential Oil and Methanol Extract of Endemic *Zataria Multiflora* Boiss [J]. *Food Control*, 2007, 18(7): 800-805.
- [22] 赵容, 张萌萌, 陈茜, 等. 基于 DPPH、ABTS 法的竹叶花椒抗氧化谱效关系研究 [J]. *中国调味品*, 2020, 45(5): 7-12.
- [23] 王鹏, 刘明秀, 李晓林, 等. 普通枇杷与野生枇杷总黄酮、总酚及抗氧化活性分析 [J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2019, 41(12): 33-39.
- [24] 张义, 刘云利, 刘子森, 等. 植物生长调节剂的研究及应用进展 [J]. *水生生物学报*, 2021, 45(3): 700-708.
- [25] REN B, ZHANG J, DONG S, et al. Exogenous 6-Benzyladenine Improves Antioxidative System and Carbon Metabolism of Summer Maize Waterlogged in the Field [J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2018, 204(2): 175-184.
- [26] ROITSCH T, EHNEB R. Regulation of Source/Sink Relations by Cytokinins [J]. *Plant Growth Regulation*, 2000, 32(2/3): 359-367.
- [27] KOHDA H, OZAKI M, NAMERA A. Production of Lignans in Calluses of *Schisandra Chinensis* [J]. *Journal of Natural Medicines*, 2012, 66(2): 373-376.
- [28] 李军, 周涛, 郑伟, 等. 外源 GA₃ 对太子参块根发育及赤霉素生物合成的调控 [J]. *分子植物育种*, 2018, 16(20): 6867-6874.
- [29] WILLIGE B C, ISONO E, RICHTER R, et al. Gibberellin Regulates PIN-FORMED Abundance and is Required for Auxin Transport-Dependent Growth and Development in *Arabidopsis Thaliana* [J]. *The Plant Cell*, 2011, 23(6): 2184-2195.
- [30] 崔北米. ABA、GA₃ 和乙烯利诱导丹参毛状根酚酸类物质的积累研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [31] 黄炼栋, 刘涤, 胡之璧. 植物激素对丹参悬浮培养细胞生长和酚酸类化合物含量的影响 [J]. *中药材*, 2000, 23(1): 1-4.
- [32] 丁传波, 赵婷, 董岭, 等. 山荆子中根皮苷和黄酮含量的测定及其乙醇提取物的抗氧化活性 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(6): 161-167.
- [33] 范广璞, 刘菊香, 刘长春. L-抗坏血酸没食子酸酯的酶催化合成及抗氧化性 [J]. *食品与发酵工业*, 2013, 39(12): 123-127.
- [34] 裴玲, 张海霞, 张岩. 没食子酸及其衍生物抗氧化活性的理论研究 [J]. *井冈山大学学报(自然科学版)*, 2015, 36(4): 27-33.