

木棉花水提物抗氧化活性及 LC-MS 成分分析研究

刘伟伟[#], 蔡泽坪, 罗 灿, 王童欣, 肖 娴, 于旭东^{*}

(海南大学 热带农林学院/热带特色林木花卉遗传与种质创新教育部重点实验室/海南省热带特色花木资源生物学重点实验室, 海南 儋州 571737 中国)

摘 要: 为挖掘木棉(*Bombax ceiba*)花水提取物(BWE)在抗氧化领域的应用潜能,通过研究 BWE 的不同料液比和煎煮时间对提取液中总黄酮含量及 DPPH 自由基清除率、ABTS 阳离子自由基清除率、Fe³⁺的还原能力等体外抗氧化指标的影响,筛选出最佳料液比和煎煮时间的工艺参数,继而借助液相色谱-质谱联用(LC-MS)分析技术对其化学成分进行深度鉴定分析。结果表明,在一定范围内, BWE 对 DPPH、ABTS 自由基的清除能力以及对 Fe³⁺还原能力随质量浓度的升高而升高,最佳参数为料液比 1:12.5,煎煮时间 1.5 h,其 IC₅₀ 分别为 87.44 和 46.77 mg·L⁻¹,但其 Fe³⁺还原能力强于 VC。BWE 具有良好的抗氧化活性,在 BWE 中共识别出 73 个黄酮类化合物,其中,相对含量较高的 4 种化学成分依次为槲皮素-3-O-葡萄糖醛酸苷(49.99%)、飞燕草素-3-O-(6"-O- α -鼠李吡喃糖基- β -吡喃葡萄糖苷)(8.24%)、芦丁(7.45%)和表儿茶素(5.65%)。

关键词: 木棉; 水提物; 抗氧化活性; 化学成分; 液相色谱-质谱联用(LC-MS)

中图分类号: R284.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-7054(2026)04-0604-13

刘伟伟, 蔡泽坪, 罗灿, 等. 木棉花水提物抗氧化活性及 LC-MS 成分分析研究[J]. 热带生物学报 (中英文), 2026, 17(4): 604–616. DOI: [10.15886/j.cnki.rdswwb.20250100](https://doi.org/10.15886/j.cnki.rdswwb.20250100) CSTR: [32425.14.j.cnki.rdswwb.20250100](https://cstr.cn/32425.14/j.cnki.rdswwb.20250100)



木棉(*Bombax ceiba*)为木棉科木棉属多年生落叶乔木,又名斑芝树、英雄花和攀枝花等。它的花期处于冬春之际,花朵大多呈现红色,观赏价值颇高,在中国广东、广西、海南和云南等地广泛种植^[1]。在中国南方民间,木棉花常被当作健康食材,人们会将它与肉类一同炖汤,或与米共煮成粥食用^[2]。这种花也是一种传统中药材,与其他 4 种药用植物的花混合,制成为“五花茶”的保健茶^[3]。木棉花味甘、性凉,具清热凉血止血、利湿解毒之效,可用于治疗腹泻、慢性炎症、发热、肝炎、痢疾和痔疮出血等症^[4]。现代药理研究显示,木棉花具有多种生物活性,如抗氧化^[5]、抗炎^[6]、抗癌^[7]、抗菌^[8]、降血糖^[9]、保肝^[10]以及调节心血管系统^[11]。此外,木棉花的化学成分丰富,主要包含挥发油类、黄酮类、苯丙素类、甾体类、脂肪酸类、微量元素,以及三萜类化合物、酚酸类化合物等。黄酮类化合物通常具有显著的清除自由基能力,同时

兼具降压、降脂、延缓衰老、增强免疫力、泻下、镇咳、祛痰、解痉及抗变态反应等多种生物活性^[12–14]。木棉花作为药食同源的传统中药材,含有丰富的生物活性成分,在医药与保健领域极具开发潜力。木棉花抗氧化作用主要源于甲醇提取物、水提物、乙醇提取物、丙酮提取物及乙醚提取物等不同提取物类型。Vieira 等^[15]发现,木棉花的甲醇提取物不仅对 DPPH 自由基具有显著的清除作用,还能有效抑制微粒体及大豆卵磷脂脂质的过氧化过程。Tundis 等^[16]研究表明,木棉花石油醚提取物对 DPPH 自由基的清除活性最强,乙醚提取物则在 β -胡萝卜素漂白试验中表现出更优的清除效果。尽管木棉花体外抗氧化活性已有众多报道,但针对其水提取物抗氧化活性的系统性探索仍有待深入。本研究通过考察不同料液比与煎煮时间对木棉花水提取物(BWE)总黄酮含量的影响,结合 DPPH 自由基清除率、ABTS 自由基清除率及

铁离子还原能力等抗氧化指标,筛选出 BWE 的最优制备参数。同时,运用液相色谱-质谱联用(LC-MS)技术解析其化学成分,旨在为 BWE 在抗氧化功能性饮品、天然化妆品等领域的产业化应用提供科学依据与数据支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂 木棉花采集于海南昌江黎族自治县(18°53'—19°30' N, 108°38'—109°17' E);芦丁(北京索莱宝科技有限公司);1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picryl-hydrazyl radical, DPPH, CAS:1898-66-4)、2,4,6 三吡啶基三嗪(2,4,6-Tri(2-pyridyl)-s-triazine, TPTZ, CAS:3 682-35-7)(上海阿拉丁生化科技股份有限公司);2,2-联氮-2-(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐(2,2'-Azinobis(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate), ABTS, CAS:30931-67-0)、盐酸、过硫酸钾、乙酸钠、磷酸氢二钾、三氯化铁(上海麦克林生化科技有限公司);其余化学试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备 电热鼓风干燥箱(DHG-9070A, 上海一恒科学仪器有限公司);中草药粉碎机(FW177, 天津市泰斯特仪器有限公司);电热恒温水浴锅(HH-S4, 北京科伟永兴仪器有限公司);旋转蒸发器(RE-2000A, 上海亚荣生化仪器厂);电子分析天平(AX124ZH, 常州奥豪斯仪器有限公司);紫外可见分光光度计(V-T3, 上海屹谱仪器制造有限公司)。隔膜真空泵(SCJ-10, 绍兴市苏珀仪器有限公司);普力菲尔超纯水机(FST-I-05, 上海富诗特仪器设备有限公司);pH 计(FE28-Standard, 上海梅特勒-托利多仪器有限公司);真空冷冻干燥机(Lab4085, 南京金实仪器设备有限公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 木棉花水提取物的制备 木棉花水提取物 Bombax ceiba water extract(简称 BWE)的提取参考文献[17]的方法并做修改。称取木棉花粉末 80 g, 以蒸馏水为溶剂, 料液比(m/V)分别为 1:10、1:12.5、1:15, 浸泡 30 min, 每 10 min 搅拌 1 次, 然后煎煮 1 和 1.5 h(温度 100 °C), 滤出药液, 残渣用蒸馏水煎煮提取 3 次。合并 3 次滤液, 旋转蒸发浓缩至 100 mL, 制成 0.8 g·mL⁻¹ 生药的木棉花水提物, 4 °C 保存备用。

1.3.2 芦丁标准曲线的绘制 使用亚硝酸钠-硝酸铝比色法测定样品中的总黄酮含量^[18-19], 并结合课题组经验做了修改。提前制备成芦丁浓度为 0.2 g·L⁻¹ 的标准液。分别取不同浓度芦丁标准液, 以体积分数 75% 的乙醇做空白对照, 加入质量分数 5% 的亚硝酸钠 1.5 mL, 混匀, 静置 6 min; 立即加入质量分数 10% 的硝酸铝 1.5 mL, 混匀, 静置 6 min; 最后加入质量分数 4% 的氢氧化钠 4 mL 和 75% 乙醇 2 mL 混匀后室温静置 30 min, 于 510 nm 波长下测定各质量浓度标样的吸光值, 以吸光度值为纵坐标, 芦丁对照品溶液浓度为横坐标, 绘制标准曲线。

1.3.3 总黄酮含量测定 按照 1.3.2 的方法, 吸取木棉花水提取液 1 mL 置于 10 mL 容量瓶中, 将相应的吸光值带入芦丁的标准工作曲线, 根据下式(1)计算总黄酮含量(Y)。

$$Y = (C_1 \times V_2) \times 100\% / V_1 \times m \times 1\,000, \quad (1)$$

式中, Y 为原料中可提取的总黄酮的百分率(%); C_1 为代入标准曲线计算得到的提取液总黄酮质量浓度(g·mL⁻¹); V_1 为测定用提取液体积(mL); V_2 为样品提取液总体积(mL); m 为样品质量(g)。

1.3.4 DPPH 自由基清除能力 参考文献[20]的方法, 并稍作调整。提前制成 0.2 mmol·L⁻¹ 的 DPPH 储备液(保存在黑暗中, 3.5 h 内用完)。分别取 2 mL 质量浓度为 50、100、200、300、400、500 mg·L⁻¹ 的 BWE 溶液, 再加入 2 mL DPPH(0.2 mmol·L⁻¹)混匀后, 室温下避光静置反应 30 min, 将维生素 C(Vitamin C, VC)设为阳性对照, 在 517 nm 波长测其吸光度, 所有待测液平行操作 3 次, 根据公式(2)计算 DPPH 清除率, 并测其及 VC 的 IC₅₀。

$$\text{清除率} = [1 - (A - A_1) / A_0] \times 100\%, \quad (2)$$

式中, A 为样品液和 DPPH 混合液的吸光度; A_1 为无水乙醇和样品液溶液混合后得到的吸光度; A_0 为 DPPH 溶液和蒸馏水混合液的吸光度。

1.3.5 ABTS 自由基清除能力 根据文献[21]的方法并稍作调整。制备 ABTS 二铵盐储备液和过硫酸钾, 将二者 1:1 混合反应 13 h 过夜, 用 pH7.4 磷酸盐缓冲液将混合液稀释 40 倍直至吸光度为 0.70±0.02, 此溶液即为 ABTS⁺自由基工作

液。分别取 0.5 mL 浓度为 50、80、100、200、300、400、500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 BWE 溶液, 然后加入 2.5 mL 的 ABTS⁺ 工作液, 将混合后的溶液避光反应 20 min。用蒸馏水作为对照, 并以 VC 为阳性参照, 在 734 nm 波长下测量吸光值, 所有待测液设置 3 组平行, 根据公式(3)计算 ABTS 清除率, 并测其及 VC 的 IC_{50} 。

$$\text{清除率} = [1 - (P_1 - P_2)/P_0] \times 100\%, \quad (3)$$

式中, P_1 为样品液与 ABTS 溶液反应后的吸光度; P_2 为蒸馏水和样品液混合后得到的吸光度; P_0 为蒸馏水与 ABTS 溶液反应后的吸光度。

1.3.6 Fe^{3+} 还原能力 采用文献 [22] 的方法测定并稍作修改。配制 300 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 醋酸钠缓冲液 (pH3.6)、10 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ TPTZ 溶液和 20 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ FeCl_3 水溶液, 以 10:1:1 比例(体积比)混合, 得到 FRAP 工作溶液(现用现配, 用之前预热至 37 $^{\circ}\text{C}$)。吸取 400 μL 质量浓度为 50、80、100、200、300、400、500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 BWE 样品溶液, 再分别加入 3 mL FRAP 工作液(37 $^{\circ}\text{C}$)。37 $^{\circ}\text{C}$ 水浴条件下反应 10 min, 在 593 nm 下测定吸光度, 做 3 次平行实验。以 VC 作为对照。反应液的吸光度值越大, 说明样品的 Fe^{3+} 的还原能力越强。

1.3.7 BWE 成分分析

1.3.7.1 供试液准备 参考文献 [23] 的方法并作部分修改。称取 10 mg 冻干粉于 2 mL 离心管, 加 1 mL 预冷的甲醇-乙腈混合液(体积比为 1:1), 涡旋 30 s 后于 -20 $^{\circ}\text{C}$ 冷冻 30 min; 12 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、4 $^{\circ}\text{C}$ 离心 10 min, 取 850 μL 上清液真空浓缩至干燥; 用 150 μL 含 5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 2-氯苯丙氨酸的 50% 甲醇复溶, 涡旋 30 s 后, 同条件离心 10 min, 取上清液过 0.22 μm 滤膜, 滤液入检测瓶待上机检测。

1.3.7.2 上机检测 色谱条件与质谱条件依据文献 [24] 的方法并作部分修改。使用 ACQUITY UPLC HSS T3 色谱柱 (100 $\text{\AA}$, 1.8 μm , 2.1 mm $\times$ 100 mm), 流速 0.4 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 柱温 40 $^{\circ}\text{C}$, 自动进样器 8 $^{\circ}\text{C}$, 进样量 2 μL 。一级全扫描选择的分辨率为 60 000, 二级分辨率选择 15 000。

1.4 数据处理 数据处理及绘图使用 Microsoft Excel 2023 和 Origin 2022, 照片处理使用 Adobe Photoshop 2023, 数据统计分析采用 SPSS v27.0 进行单因素方差分析, 所有数据均基于平均值 $\pm$ 标准

差(平均值 $\pm$ SEM)。 $P < 0.05$ 表示差异显著, $P < 0.01$ 表示差异极显著。

2 结果与分析

2.1 芦丁标准曲线的绘制 芦丁标准曲线如图 1 所示, 以芦丁为标准品, 以测得的吸光度值为纵坐标, 对应的芦丁质量浓度为横坐标绘制标准曲线, 得到标准曲线回归方程为 $y = 0.95x + 0.0113$, $R^2 = 0.9998$, 表明芦丁质量浓度在 0.02 ~ 0.12 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内, 吸光度与取其质量浓度具有良好的线性关系。

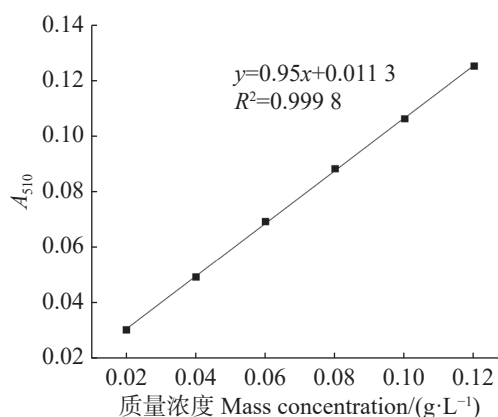


图 1 芦丁的标准曲线图

Fig. 1 Standard curve of rutin

2.2 总黄酮含量测定 从表 1 可知, 料液比 1:12.5, 煎煮时间 1.5 h, 此时总黄酮含量最高, 为 1.21%, 优于其他试验组合的结果, 可作为木棉花提取总黄酮的最佳工艺条件。

2.3 BWE 自由基清除能力评价

2.3.1 DPPH 自由基清除率 由图 2 可知, 随着质量浓度的增加, BWE 的 DPPH 自由基的清除率整体呈上升趋势, 表明在该质量浓度范围内, BWE 的抗氧化能力随浓度升高而增强。当质量浓度处于 50 ~ 200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 随着质量浓度的上升, BWE 对 DPPH 自由基的清除率呈上升趋势, 且在此范围内表现出显著的量效关系。当质量浓度进一步升至 200 ~ 500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其清除率趋近饱和, 达到甚至超过 90%, 说明质量浓度的升高有助于提高 DPPH 自由基的清除能力, 而在较高质量浓度下清除效果趋于稳定。在相同质量浓度和料液比下, 1:10 1 h 的自由清除率高于 1.5 h; 1:15 1 h 的高于 1.5 h; 1:12.5 1.5 h 和 1:12.5 1 h 的均高于其他组合, 同时 1:12.5 1.5 h 的 BWE 质量浓度在

表1 木棉花水提物总黄酮含量测定

Tab. 1 Determination of total flavonoids content of aqueous extract of Kapok flower

处理 Treatment	总黄酮含量/% Total flavonoids content
1:10 1 h	0.92
1:10 1.5 h	0.64
1:12.5 1 h	1.20
1:12.5 1.5 h	1.21
1:15 1 h	1.00
1:15 1.5 h	0.87

注: 1:10 1 h 表示料液比为 1:10、煎煮时间为 1 h, 其余条件同此。下同。

Note: "1:10 1 h" refers to a material-to-liquid ratio of 1:10 with a decoction time of 1 h; the other conditions are the same as above. Similarly hereinafter.

200 mg·L⁻¹ 时, 清除率效果最好, 且最先达到 90% 以上, 为 92.04%, 同时其 1.5 h 的略高于 1 h, 说明适当延长作用时间, 可能有助于提高抗氧化效果。VC 的 IC₅₀ 为 14.55 mg·L⁻¹; BWE 1:10 1 h 的 IC₅₀ 为 157.92 mg·L⁻¹; 1:10 1.5 h 的 IC₅₀ 为 186.26 mg·L⁻¹; 1:12.5 1 h 的 IC₅₀ 为 111.51 mg·L⁻¹; 1:12.5 1.5 h 的 IC₅₀ 为 87.44 mg·L⁻¹; 1:15 1 h 的 IC₅₀ 为 117.24 mg·L⁻¹; 1:15 1.5 h 的 IC₅₀ 为 137.83 mg·L⁻¹, 它们之间差异极显著($P<0.01$)。实验结果表明, BWE 对 DPPH 自由基的清除能力弱于 VC, 其中, BWE 的 1:12.5 1.5 h 对 DPPH 自由基的清除能力最好。

2.3.2 ABTS 自由基清除率 由图 3 可知, 随着 BWE 质量浓度升高, ABTS 自由基清除率整体呈上升趋势。这表明在实验设定的质量浓度范围内, BWE 质量浓度越高, ABTS 自由基的清除能力越强, 即抗氧化能力越强。当 BWE 质量浓度处于 50~200 mg·L⁻¹ 时, 其与 ABTS 自由基清除率呈正相关, 且在此范围内表现出明显的量效关系。当 BWE 质量浓度达到 200 mg·L⁻¹ 时, 其对 ABTS 自由基的清除率可达 91.73%, 而后随着质量浓度的进一步增加, 清除率变化趋于平稳, 接近 100%。在相同质量浓度和料液比下, 1:10 1 h 的自由清除率高于 1.5 h; 1:15 1 h 的自由清除率高于 1.5 h; 1:12.5 1.5 h 和 1:12.5 1 h 清除率均高于其他组合, 同时 1:12.5 1.5 h 的 BWE 质量浓度在 100 mg·L⁻¹ 时清除率效果最好, 最先达到 90% 以

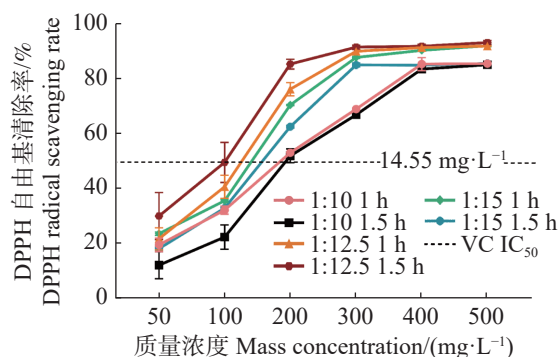


图2 不同质量浓度的 BWE 对 DPPH 自由基清除能力
Fig. 2 DPPH radical scavenging ability of BWE at different concentrations

上, 为 94.41%, 同时其 1.5 h 的清除率略高于 1 h, 说明适当延长作用时间, 可能有助于提高抗氧化效果。VC 的 IC₅₀ 为 6.08 mg·L⁻¹; BWE 1:10 1 h 的 IC₅₀ 为 67.71 mg·L⁻¹; 1:10 1.5 h 的 IC₅₀ 为 81.21 mg·L⁻¹; 1:12.5 1 h 的 IC₅₀ 为 51.25 mg·L⁻¹; 1:12.5 1.5 h 的 IC₅₀ 为 46.77 mg·L⁻¹; 1:15 1 h 的 IC₅₀ 为 59.24 mg·L⁻¹; 1:15 1.5 h 的 IC₅₀ 为 73.86 mg·L⁻¹, 它们之间差异极显著($P<0.01$)。上述结果表明, BWE 对 ABTS 自由基的清除能力弱于 VC, 其中, BWE 1:12.5 1.5 h 对 ABTS 自由基的清除能力最好。

2.3.3 还原能力检测 从图 4 可知, BWE 对 Fe³⁺ 的还原能力随着 BWE 质量浓度(50~500 mg·L⁻¹) 的升高而增强, 吸光值也逐渐增大, 二者的还原能力逐渐增强, 表现出明显的量效关系。在相同质量浓度条件下, 1:12.5 1.5 h 和 1:12.5 1 h 的铁还原能力均强于 VC, 而 1:10 1 h、1:10 1.5 h 和 1:15 1.5 h 的 Fe³⁺ 的还原能力均低于 VC, 但 1:15 1 h 的 BWE 在质量浓度高于 200 mg·L⁻¹ 时, 其 Fe³⁺ 的还原能力高于 VC。结果表明, BWE 1:12.5 1.5 h 对 Fe³⁺ 的还原能力最强。

2.3.4 BWE 成分分析结果 LC-MS 能够准确测定物质的分子量及其他结构信息, 对研究 BWE 提取物组成成分具有重要意义。本研究测定结果用 Xcalibur v4.2 软件进行处理和分析。下图为 BWE 提取物混样质控 QC 样本的正负离子模式色谱图, 横坐标为代谢物检测的保留时间, 纵坐标为离子检测的离子流强度。结果如图 5。

利用液相色谱-质谱联用技术测定出了 BWE 提取物中的有效成分, 主要有黄酮类、苯丙素类、脂肪酸类等物质, 其中, 黄酮类物质含量高达 73 种(表 2)。进一步对检测出的黄酮类化合物进

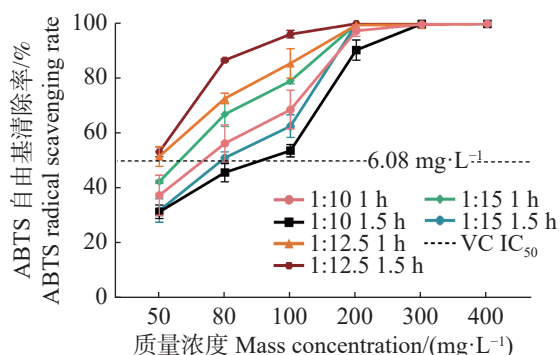


图3 不同质量浓度的 BWE 对 ABTS 自由基清除能力
Fig. 3 ABTS radical scavenging ability of BWE at different concentrations

行分类,分为黄烷类、黄酮、黄酮苷、羟基黄酮、O-甲基黄酮和吡喃洛酮类、双黄酮和多聚黄酮 7 类。其中,样本中以黄酮苷和黄烷类化合物占主导,分别有 37 个和 16 个。本研究中相对含量最高的 4 种化学成分依次为槲皮素-3-O-葡萄糖醛酸苷(49.99%)、飞燕草素-3-O-(6"-O- α -鼠李吡喃糖基- β -吡喃葡萄糖苷)(8.24%)、芦丁(7.45%)、表儿茶素(5.65%)。其余的为 9 种 O-甲基化黄酮类化合物、4 种黄酮类化合物、4 种双黄酮和多聚黄酮类化合物、2 种吡喃类黄酮化合物及 1 种羟基黄酮类化合物。杨梅素-3-葡萄糖醛酸苷、异鼠李素-3-芸香糖苷、山柰酚-3-O-芸香糖苷、槲皮素-3-O-葡萄糖醛酸苷、木犀草素-7-O-葡萄糖苷等属于黄酮苷类,该类物质的苷元主要包括槲皮素、山柰酚和异鼠李素,其具备抗氧化、延缓衰老以及清除自由基的功效;儿茶素、没食子儿茶素、表儿茶素、没食子儿茶素、柚皮素等属于黄烷类;其具有抗炎免疫、调节血脂、保护心血管等功效。

3 讨论

3.1 BWE 总黄酮提取率 黄酮类化合物的提取方式包括有机溶剂提取法、索氏提取法、微波提取法、超声波提取法、酶解提取法、超临界流体萃取法、大孔树脂吸附法^[25]。目前,林庆景等^[26]通过研究得出超声波辅助乙醇提取木棉花总黄酮的最优工艺条件为乙醇体积分数为 41%,料液比为 31:1,超声波功率为 470 W,在此条件下,木棉花总黄酮的提取率为 4.35%。何秋彤等^[27]系统比较了蒸馏水、质量浓度为 500 g·L⁻¹ 的乙醇溶液、质量浓度为 800 g·L⁻¹ 的丙酮溶液对木棉花黄酮含量的提取

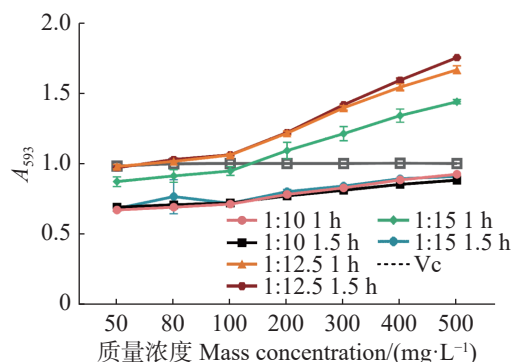
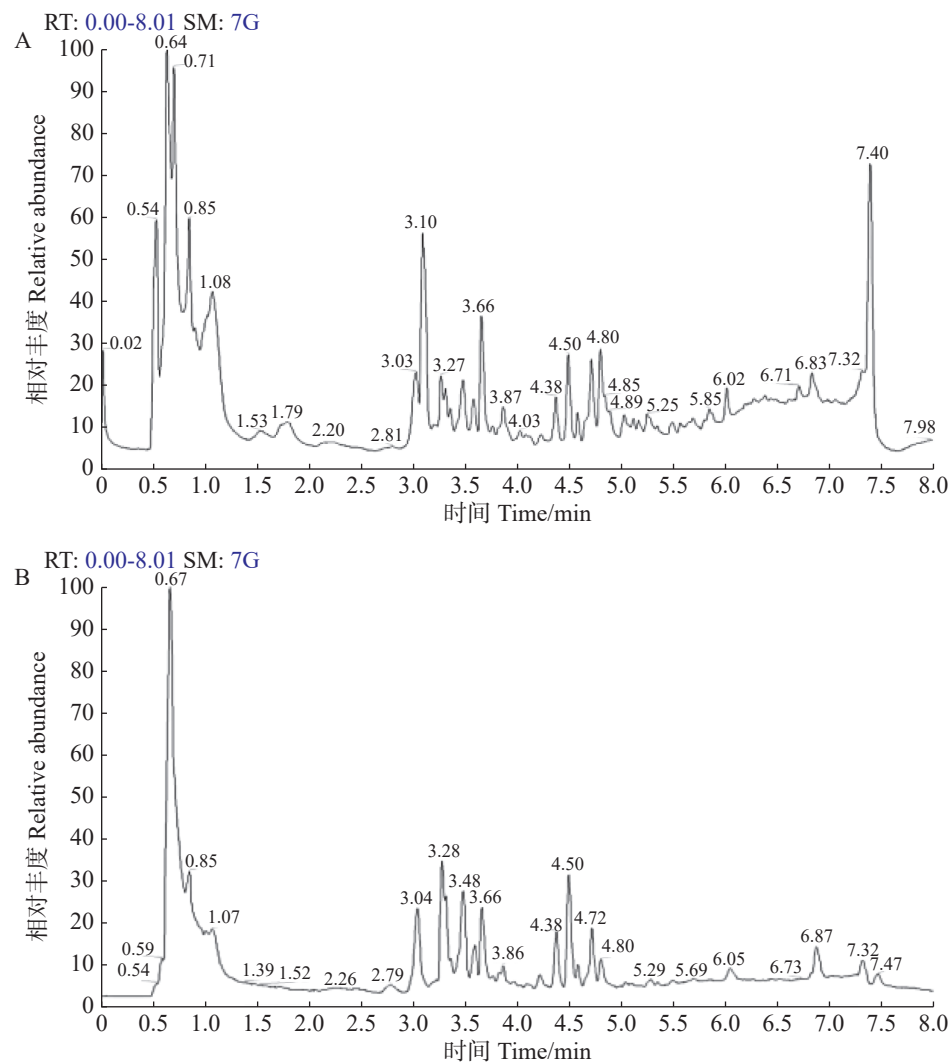


图4 不同质量浓度的 BWE 的还原能力
Fig. 4 The restoration ability of BWE at different concentrations

率,结果显示,木棉花水提取在黄酮提取率指标上有一定优势,黄酮含量为(39.62±2.68)mg·g⁻¹。不过,该实验采用三氯化铝法测定黄酮含量,以(+)-儿茶素为对照品;而本实验采用亚硝酸钠-硝酸铝比色法测定,以芦丁为对照品,且两者在提取方法(溶剂、温度、时间)及计算公式上也略有差异,因此得到的总黄酮提取率有所不同。而在广西民间,人们常将采摘的新鲜木棉花晾晒干燥,制成木棉花茶。本研究采用无毒无害的水提法处理木棉花,以规避甲醇、乙醇、丙酮等工业有机溶剂的毒性与残留风险。在此基础上,本研究重点优化了料液比和煎煮时间的参数。该方法绿色温和,操作简便,更符合食品安全与药品监管要求,具备良好的日常应用潜力。实验结果最终筛选出 BWE 的最优制备参数为料液比 1:12.5,煎煮时间 1.5 h,在此条件下,木棉花黄酮含量最高,为 1.21%。

3.2 BWE 中的抗氧化活性探讨 木棉花的水提取物(BWE)展现出较强的抗氧化能力。何秋彤等^[27]对木棉花水提取物、乙醇提取物、丙酮提取物进行了抗氧化研究,发现 3 种提取物的 DPPH 自由基清除率在不同程度上与总黄酮含量呈正相关,其中水提取物对 DPPH 有较强的自由基清除能力,IC₅₀ 为 (2554.67±3.83)mg·L⁻¹,表明木棉花具有突出的抗氧化性。Wanjari 等^[28]通过检测木棉花水提取物 DPPH 自由基清除活性来确定其抗氧化活性,结果显示,木棉花水提取物的 DPPH 自由基清除活性较强,IC₅₀ 为 50.21 mg·L⁻¹。Yu 等^[29]采用 DPPH 清除实验、氧自由基吸收能力法、正三价铁离子还原能力实验、脂质过氧化抑制实验,对木棉花 3 种提取物(水提取物、50% 乙醇提取物、80% 丙酮提取物)的体外抗氧化活性进行了检



A.正离子模式色谱图; B.负离子模式色谱图。
A.Positive ion mode chromatogram; B.Negative ion mode chromatogram.
图 5 正负离子模式色谱图
Fig. 5 Chromatogram of positive and negative ion modes

表 2 BWE 提取物中黄酮类化合物及其衍生物的初步鉴定

Tab. 2 Preliminary identification of flavonoids and their derivatives extracted from BWE

编号 No.	离子模式 Ion mode	参考离子 Reference ion	分子式 Formula	物质 Substance	分类 Classification	登记号 CAS	相对含量 /% Relative content
1	Positive	[M+H] ⁺	C ₁₅ H ₁₄ O ₇	(+)-没食子儿茶素	黄烷类	970-73-0	2.68
2	Positive	[M+H] ⁺	C ₂₁ H ₂₀ O ₄	2-(4-甲氧基苯基)-8,8-二甲基-2,3-二氢吡喃[2,3-]铬-4-酮	吡喃类黄酮	—	0.08
3	Positive	[M+NH ₄] ⁺	C ₁₅ H ₁₄ O ₇	(-)-表没食子儿茶素	黄烷类	970-74-1	0.25
4	Positive	[M+H] ⁺	C ₂₁ H ₂₄ O ₁₁	表儿茶素-8-C-β-D-吡喃葡萄糖苷	黄酮苷类	—	0.05
5	Positive	[M+H] ⁺	C ₂₇ H ₃₀ O ₁₅	芹菜素-6,8-二半乳糖苷	黄酮苷类	—	0.58
6	Positive	[M+H-H ₂ O] ⁺	C ₁₆ H ₁₄ O ₆	高圣草酚	O-甲基黄酮	446-71-9	0.11
7	Positive	[M+H] ⁺	C ₁₅ H ₁₂ O ₆	(2R,3R)-3,5,7-三羟基-2-(3-羟基苯基)-2,3-二氢铬-4-酮	黄烷类	—	1.02
8	Positive	[M+H] ⁺	C ₂₇ H ₂₈ O ₁₈	槲皮素-3-葡萄糖苷-7-葡萄糖醛酸	黄酮苷类	—	0.28

续表 2 Tab. 2 Continued

编号 No.	离子模式 Ion mode	参考离子 Reference ion	分子式 Formula	物质 Substance	分类 Classification	登记号 CAS	相对含量 /% Relative content
9	Positive	[M+H] ⁺	C ₂₈ H ₃₂ O ₁₇	鼠李素3-O-槐糖苷	黄酮苷类	—	0.09
10	Positive	[M+H] ⁺	C ₃₄ H ₄₂ O ₂₁	异鼠李素-3-O-槐糖苷-7-O-鼠李糖 苷	黄酮苷类	41 328-75-0	0.04
11	Positive	[M+H] ⁺	C ₂₇ H ₃₀ O ₁₆	芦丁	黄酮苷类	153-18-4	7.45
12	Positive	[M+H] ⁺	C ₁₅ H ₁₄ O ₆	儿茶素	黄烷类	154-23-4	0.21
13	Positive	[2M+Na] ⁺	C ₂₁ H ₂₀ O ₁₀	牡荆素	黄酮苷类	3 681-93-4	0.05
14	Positive	[M+H] ⁺	C ₁₅ H ₁₂ O ₅	柚皮素	黄烷类	480-41-1	0.30
15	Positive	[2M+NH ₄] ⁺	C ₁₅ H ₁₀ O ₇	槲皮素	黄酮类	117-39-5	2.79
16	Positive	[M+H] ⁺	C ₂₇ H ₃₀ O ₁₅	山柰酚-3-O-芸香糖苷	黄酮苷类	17 650-84-9	0.41
17	Positive	[2M+Na] ⁺	C ₂₀ H ₁₈ O ₁₁	槲皮素3-O- α -L-阿拉伯糖苷	黄酮苷类	—	0.06
18	Positive	[M+Na] ⁺	C ₂₁ H ₂₄ O ₁₀	根皮苷	黄酮苷类	60-81-1	0.06
19	Positive	[M+CH ₃ OH+H] ⁺	C ₂₁ H ₂₀ O ₁₁	紫云英苷	黄酮苷类	480-10-4	0.31
20	Positive	[M+H] ⁺	C ₁₅ H ₁₀ O ₆	山柰酚	黄酮类	520-18-3	0.17
21	Positive	[M+CH ₃ OH+H] ⁺	C ₃₄ H ₄₂ O ₂₀	鼠李黄素	黄酮苷类	1 324-63-6	0.10
22	Positive	[M+H] ⁺	C ₁₅ H ₁₀ O ₇	5,7,3',4',5'-五羟基黄酮	黄酮类	520-31-0	0.18
23	Positive	[M+H] ⁺	C ₃₀ H ₂₆ O ₁₄	[(2R,3S,4S,5R,6R)-3,4,5-三羟基 -6-[2-羟基-5-(3,5,7-三羟基-4-氧 铬基-2-基)苯氧基]氧杂-2-基]甲基 3-(4-羟基苯基)丙-2-烯酸酯 5,7-二羟基-2-(4-羟基苯基)	黄酮苷类	—	0.07
24	Positive	[2M+Na] ⁺	C ₂₁ H ₂₂ O ₁₀	-6-[3,4,5-三羟基-6-(羟甲基)氧杂 -2-基]-3,4-二氢-2H-1-苯并吡喃 -4-酮	黄酮苷类	—	0.04
25	Positive	[M+H] ⁺	C ₁₅ H ₁₀ O ₆	漆黄素	黄酮类	528-48-3	0.16
26	Positive	[M+H] ⁺	C ₁₈ H ₁₈ O ₆	5,7-二羟基-2-(4-羟基苯基)-3,4-二 氢-2H-1-苯并吡喃-8-羧酸乙酯	羟基黄酮类化 合物	—	0.10
27	Positive	[M+H] ⁺	C ₁₅ H ₁₂ O ₅	5,7-二羟基-2-(3-羟基苯基)-3,4-二 氢-2H-1-苯并吡喃-4-酮	黄烷类	—	0.47
28	Positive	[M+H] ⁺	C ₁₆ H ₁₄ O ₅	5,7,4'-三羟基-8-甲基二氢黄酮	黄烷类	916 917-28- 7	0.04
29	Positive	[M+NH ₄] ⁺	C ₂₇ H ₃₀ O ₁₆	2-[3,4-双[(2S,3R,4S,5S,6R) -3,4,5-三羟基-6-(羟甲基)氧杂 -2-基]氧基]苯基]-5,7-二羟基铬 -4-酮	黄酮苷类	—	1.17
30	Negative	[M-H] ⁻	C ₂₀ H ₁₈ O ₇	6-(5,7-二羟基-4-氧代-3,4-二氢 -2H-1-苯并吡喃-2-基)-8-羟基 -2,2-二甲基-3,4-二氢-2H-1-苯并吡 喃-4-酮	黄烷类	—	0.70
31	Negative	[M-H] ⁻	C ₁₈ H ₁₄ O ₆	2-(2H-1,3-苯并二氧醇-5-基) -5,7-二甲氧基-4H-铬-4-酮	O-甲基黄酮	—	0.63
32	Negative	[M-H] ⁻	C ₃₃ H ₄₀ O ₂₁	山柰酚-3-O-槐二糖-7-O-葡萄糖苷	黄酮苷类	55 136-76-0	0.11
33	Negative	[M-H] ⁻	C ₂₁ H ₂₄ O ₁₁	儿茶素-4'-O- β -D-吡喃葡萄糖苷	黄酮苷类	—	0.16
34	Negative	[M-2H] ²⁻	C ₂₇ H ₃₀ O ₁₇	槲皮素-3,4'-O-二- β -吡喃葡萄糖苷	双黄酮和多聚 黄酮类	—	0.01
35	Negative	[M-H] ⁻	C ₂₁ H ₂₀ O ₁₁	木犀草素-7-O-葡萄糖苷	黄酮苷类	5 373-11-5	0.06

续表2 Tab. 2 Continued

编号 No.	离子模式 Ion mode	参考离子 Reference ion	分子式 Formula	物质 Substance	分类 Classification	登记号 CAS	相对含量 /% Relative content
36	Negative [M-H]-		C ₂₇ H ₃₁ O ₁₅	矢车菊素-3-O-芸香糖苷	黄酮苷类	28338-59-2	0.32
37	Negative [M-H]-		C ₃₀ H ₂₆ O ₁₂	原花青素二聚体	双黄酮和多聚 黄酮类	—	0.01
38	Negative [M-H]-		C ₁₇ H ₁₄ O ₉	5,7-二羟基-3,6-二甲氧基-2-(3,4,5- 三羟基苯基)-4H-色原酮-4-酮	O-甲基黄酮	—	0.78
39	Negative [M-H]-		C ₂₁ H ₂₂ O ₁₃	二氢杨梅-7-葡萄糖苷	黄酮苷类	—	0.11
40	Negative [M-H]-		C ₂₄ H ₂₄ O ₇	2-(3,4-二甲氧基苯基)-5,10-二甲氧 基-8,8-二甲基吡喃[3,2-g]铬-4-酮	吡喃洛酮类	—	0.08
41	Negative [M-H]-		C ₄₅ H ₃₈ O ₁₈	原花青素 C1	双黄酮和多聚 黄酮类	37064-30-5	1.38
42	Negative [M-H]-		C ₂₁ H ₂₂ O ₁₁	毛果枳椇苷C	黄酮苷类	—	0.71
43	Negative [M-H]-		C ₁₅ H ₁₄ O ₆	表儿茶素	黄烷类	490-46-0	5.65
44	Negative [M-H]-		C ₁₅ H ₁₄ O ₆	L-(-)-儿茶素	黄烷类	—	0.35
45	Negative [M-H]-		C ₃₀ H ₂₆ O ₁₁	(2R,3R,4S)-2-(4-羟基苯基) -4-[(2R,3R,4S)-4,7,8-三羟基-2-(4- 羟基苯基)-3,4-二氢-2H-1-苯并吡喃 -3-基]氧}-3,4-二氢-2H-1-苯并吡喃 -3,7,8-三醇	黄烷类	—	0.09
46	Negative [M-H]-		C ₂₁ H ₁₈ O ₁₄	杨梅素-3-葡萄糖醛酸苷	黄酮苷类	77363-65-6	0.13
47	Negative [M-H]-		C ₃₂ H ₂₄ O ₁₀	5-羟基-2-(4-[[5-羟基-2-(4-羟基 苯基)-7-甲氧基-4-氧代-3,4-二氢 -2H-1-苯并吡喃-6-基]氧基}苯基) -7-甲氧基-4H-铬-4-酮	O-甲基黄酮	—	0.10
48	Negative [M-H]-		C ₂₁ H ₂₀ O ₁₂	槲皮素-4'-O-葡萄糖苷	黄酮苷类	—	0.14
49	Negative [M+Cl]-		C ₂₇ H ₃₀ O ₁₆	多花苷A	黄酮苷类	—	0.68
50	Negative [M-2H]-		C ₂₇ H ₃₁ O ₁₆	飞燕草素-3-O-(6"-O- α -鼠李吡喃糖 基- β -吡喃葡萄糖苷)	黄酮苷类	—	8.24
51	Negative [M-H]-		C ₃₀ H ₂₆ O ₁₂	(+)-原花青素 B2	双黄酮和多聚 黄酮类	29106-49-8	0.32
52	Negative [M-H]-		C ₂₁ H ₁₈ O ₁₃	槲皮素-3-O-葡萄糖醛酸苷	黄酮苷类	22688-79-5	49.99
53	Negative [M-H]-		C ₂₈ H ₂₄ O ₁₆	2"-O-没食子酰基金丝桃苷	黄酮苷类	53209-27-1	0.34
54	Negative [M-H]-		C ₂₁ H ₂₀ O ₁₂	异槲皮素	黄酮苷类	21637-25-2	3.89
55	Negative [M-H]-		C ₂₁ H ₂₀ O ₁₂	金丝桃苷	黄酮苷类	482-36-0	0.08
56	Negative [M-H]-		C ₁₆ H ₁₆ O ₇	(2r,3r,4r)-2-(3-羟基-4-甲氧基苯 基)-3,4-二氢-2H-1-苯并吡喃 -3,4,7,8-四醇	黄烷类	—	0.26
57	Negative [M-H]-		C ₂₈ H ₃₂ O ₁₆	异鼠李素-3-芸香糖苷	黄酮苷类	604-80-8	0.16
58	Negative [M-2H]2-		C ₂₁ H ₁₈ O ₁₂	木犀草素-7-O-葡萄糖醛酸苷	黄酮苷类	29741-10-4	2.47
59	Negative [M-H]-		C ₁₅ H ₁₂ O ₇	二氢槲皮素	黄烷类	480-18-2	0.51
60	Negative [M-H]-		C ₂₂ H ₂₄ O ₁₁	高圣草素-7-O- β -D-葡萄糖苷	黄酮苷类	14982-11-7	0.17
61	Negative [M-H]-		C ₂₃ H ₂₄ O ₁₂	白桦油醇-3-半乳糖苷	黄酮苷类	—	0.08
62	Negative [M-H]-		C ₂₃ H ₂₄ O ₁₁	5-羟基-2-(4-羟基-3,5-二甲氧基苯 基)-7-[(2S,3S,5S)-3,4,5-三羟基 -6-(羟甲基)氧噻-2-基]铬-4-酮	黄酮苷类	—	0.13
63	Negative [M-H]-		C ₂₁ H ₂₄ O ₈	2,3,3,5,6,7-六甲氧基-2-苯基-1-苯并 吡喃-4-酮	O-甲基黄酮	—	0.08

续表 2 Tab. 2 Continued

编号 No.	离子模式 Ion mode	参考离子 Reference ion	分子式 Formula	物质 Substance	分类 Classification	登记号 CAS	相对含量 /% Relative content
64	Negative [M-H]-		C ₁₅ H ₁₂ O ₆	二氢山柰酚	黄烷类	480-20-6	0.58
65	Negative [M-H]-		C ₂₄ H ₂₀ O ₈	9,10-二氢-10-(4-羟基苯基)-吡喃基 [2,3-h]表儿茶素-8-酮	黄烷类	—	0.15
66	Negative [M-H]-		C ₂₁ H ₂₀ O ₁₁	木犀草素-7-O-葡萄糖苷	黄酮苷类	5373-11-5	0.06
67	Negative [M-H]-		C ₂₀ H ₁₈ O ₉	5-羟基-3,6,7,8-四甲氧基-3',4'-亚甲 二氧基黄酮	O-甲基黄酮	—	0.09
68	Negative [M-H]-		C ₂₁ H ₂₂ O ₁₀	(2S,3R,4S,5S,6R)-2-[[(6aS,11aS) -6a,9-二羟基-6,11a-二氢-[1]苯并呋 喃[3,2-c]铬-3-基]氧基]-6-(羟甲基) 氧代-3,4,5-三醇	黄酮苷类	—	0.09
69	Negative [M-H]-		C ₂₁ H ₂₀ O ₁₂	(2S)-二氧化二酰-7-O-β-D-吡喃葡 萄糖醛酸	黄酮苷类	—	0.13
70	Negative [M-H]-		C ₂₂ H ₂₂ O ₁₀	4,7,9-三甲氧基-6-(3,4,5-三甲氧基 苯基)-2h-[1, 3]二氧氧基[4,5-g]铬 -8-酮	O-甲基黄酮	—	0.06
71	Negative [M-H]-		C ₁₆ H ₁₄ O ₆	橙皮素	O-甲基黄酮	520-33-2	0.29
72	Negative [M-H]-		C ₁₆ H ₁₄ O ₅	二氢木蝴蝶素A	O-甲基黄酮	18956-18-8	0.05
73	Negative [M-H]-		C ₂₃ H ₂₄ O ₇	(2S)-5,7-二甲氧基-8-(2S-羟基 -3-甲基-3-丁烯基)-3',4'-亚甲二氧 基黄烷酮	黄烷类	—	0.04

测。结果显示,水提物对 DPPH 有较强的自由基清除能力,IC₅₀ 为(554.67±3.83)mg·L⁻¹。与阳性对照抗坏血酸或没食子酸相比,所有木棉花提取物均展现出良好的抗氧化性能,各提取物中总黄酮含量越高,其抗氧化作用越强。本研究借助分析不同料液比和煎煮时间对木棉花水提取物(BWE)的总黄酮含量带来的影响,连同 DPPH 自由基清除率、ABTS 自由基清除率及铁离子还原能力等抗氧化指标,最终挑选出 BWE 的最优制备参数料液比 1:12.5,煎煮时间为 1.5 h,此条件下的木棉花黄酮含量最高,为 1.21%。从抗氧化实验结果来看,黄酮含量最高的料液比 1:12.5,煎煮时间 1.5 h 的 BWE 对 DPPH 和 ABTS 两种自由基能力均高于其料液比与煎煮时间,其半抑制浓度 IC₅₀ 分别为 87.44 mg·L⁻¹,46.77 mg·L⁻¹;且在 Fe³⁺的还原能力方面,具有同样的效果,说明木棉花水提物具有良好的体外抗氧化活性。实验结果与前人的研究结果趋势一致,甚至本研究中水提物的制备方法其自由基清除能力优于部分前人的研究,均证实了木棉具有良好的抗氧化活性以及黄酮含量与抗氧化能力呈正相关。

3.3 BWE 中的成分分析 根据现有文献报道,从木棉花甲醇及乙醇提取物中已分离鉴定出以下黄酮类化合物包括儿茶素、芹菜素、槲皮素-3-O-β-D-吡喃葡萄糖苷、槲皮素-3-O-芸香糖苷(芦丁)、槲皮素-3-O-β-D-吡喃半乳糖醛酸苷、槲皮素-3-O-β-D-吡喃葡萄糖醛酸苷、山柰酚-3-O-芸香糖苷、山柰酚-3-O-β-D-吡喃葡萄糖醛酸苷、金合欢素-7-O-芸香糖苷(蒙花苷)、芹菜素-7-O-β-D-吡喃葡萄糖苷(大波斯菊苷)、芹菜素-7-O-β-新橘皮糖苷、矢车菊素-3-O-葡萄糖苷、天竺葵色素-5-O-β-D-吡喃葡萄糖苷(翠菊色苷)、矢车菊素-7-甲醚-3-β-D-吡喃葡萄糖苷、芹菜素-8-C-葡萄糖苷(牡荆素)、芹菜素-6-C-葡萄糖苷(异牡荆素)、芹菜素-6,8-二-C-β-吡喃葡糖苷(新西兰牡荆苷-2)、芹菜素-6-C-葡萄糖-7-O-葡萄糖苷(皂草苷)、木犀草素-6-C-葡萄糖苷、山柰酚-3-O-(6"-O-E-p-酰基)-β-D-吡喃葡萄糖苷、栎草亭-3-O-β-D-呋喃葡萄糖苷、异鼠李素-3-O-β-D-葡萄糖苷、六羟黄酮(栎草亭)、Sexangularetin-3-O-sophoroside、黄姜味草醇(5,4'-二羟基-6,7,8-三甲氧基黄酮)、芒果苷、异芒果苷、7-O-甲基

芒果苷、知母宁、Muraxanthone 等^[30-39]。而山柰酚 3-槐糖苷 7-葡萄糖苷、异鼠李素-3-O-槐糖苷-7-O-鼠李糖苷、5,7-二羟基-2-(4-羟基苯基)-3,4-二氢-2H-1-苯并吡喃-8-羧酸乙酯、2,4,6,4'-四羟基-2-苄基香豆素 4-O-葡萄糖苷、(2R, 3R, 4S)-2-(4-羟基苯基)-4-[(2R, 3R, 4S)-4,7,8-三羟基-2-(4-羟基苯基)-3,4-二氢-2H-1-苯并吡喃-3-基]氧}-3,4-二氢-2H-1-苯并吡喃-3,7,8-三醇、5-羟基-2-(4-[[5-羟基-2-(4-羟基苯基)-7-甲氧基-4-氧代-3,4-二氢-2H-1-苯并吡喃-6-基]氧基]苯基)-7-甲氧基-4H-铬-4-酮、3-[6-[[3,5-二羟基-6-甲基-4-[3,4,5-三羟基-6-甲基氧噻-2-基]氧噻-2-基]氧甲基]-3,4,5-三羟基氧噻-2-基]氧基-2-(3,4-二羟基苯基)-5-羟基-7-甲氧基铬基-4-酮是首次从该植物中水提取物中分离得到。现阶段针对木棉花水提取物(BWE)的黄酮类成分研究相对较少。本研究在已有基础上进行了系统性补充,通过 LC-MS 等技术共鉴定出 73 种黄酮类化合物,丰富了木棉花水提取物的成分数据库。木棉花水提取物比甲醇及乙醇提取物鉴定出更多化合物,可能归因于以下机制 ①极性适配性:水溶剂(高极性)更有利于黄酮糖苷(如芦丁、槲皮素苷)的溶出,而甲醇/乙醇提取物以苷元为主;②提取条件优势:水提法(常压、低温)可减少热敏性黄酮(如某些酚羟基衍生物)的降解;③基质干扰少:水提取物中脂溶性杂质较少,有利于 LC-MS 对黄酮苷类化合物的精准鉴定。不同溶剂因极性、溶解特性及提取动力学差异,导致其化学成分谱存在显著区别。水提取物因更适配黄酮糖苷的提取需求,在黄酮类化合物的鉴定数量和多样性上展现出独特优势。这一发现为木棉花水提取物的深度开发和标准化研究提供了重要依据。

木棉花水提取物经 LC-MS 分析,鉴定到 73 种黄酮类化合物,其中含量最多的 4 个成分槲皮素-3-O-葡萄糖醛酸苷、飞燕草素-3-O-(6"-O- α -鼠李吡喃糖基- β -吡喃葡萄糖苷、芦丁、表儿茶素。有相关研究显示,黄酮类化合物具备优良的生物活性,比如在改善心血管疾病、增强人体免疫系统功能以及提升动物生产性能等方面均有表现;除此之外,其还具有易溶解且储存周期较长的特性^[40-41]。其中,槲皮素 3-O-葡萄糖醛酸苷这种天然类黄酮化合物不仅具有抗氧化性,还能抑制动

脉粥样硬化形成,并可作为 CBR1 抑制剂^[42-44]。芦丁具有多重生理活性,能清除自由基、促进成骨细胞增殖、降低血糖,并抑制结直肠癌与前列腺癌细胞生长,从而对人体多器官系统发挥保护作用^[45]。飞燕草素-3-O-(6"-O- α -鼠李吡喃糖基- β -吡喃葡萄糖苷)通过其强大的抗增殖活性,展现出巨大的抗癌潜力^[46-47]。表儿茶素是一种黄烷醇化合物,广泛分布于多种中药材中。它具有抗氧化、降血糖和预防心血管疾病等功效^[48-49]。研究表明,它还能改善小鼠心肌缺血缺氧的状况^[50]。

4 结 论

本研究借助分析不同料液比和煎煮时间对木棉花水提取物(BWE)的总黄酮含量带来的影响,连同 DPPH 自由基清除率、ABTS 自由基清除率及铁离子还原能力等抗氧化指标,最终挑选出 BWE 的最优制备参数料液比 1:12.5,煎煮时间为 1.5 h,此条件下的木棉花黄酮含量最高,为 1.21%。通过试验证实 BWE 具有良好的抗氧化活性,且对 DPPH 自由基、ABTS 自由基的清除能力、Fe³⁺的还原能力与其质量浓度存在明显的量效对应关系,表现为一定的质量浓度范围内,BWE 的质量浓度越高,其抗氧化活性越强。BWE 具有良好的体外抗氧化活性,可能与其含有丰富黄酮类物质有关。

本研究基于 LC-MS 分析,从 BWE 中共初步鉴定出 73 种主要的黄酮类活性化合物,这些化合物可归为七大类:黄烷类、黄酮类及其黄酮苷、羟基黄酮、O-甲基黄酮及吡喃洛酮类、双黄酮类和多聚黄酮类。样品化学成分分析显示,黄酮苷和黄烷类化合物占据主导地位,其数量分别为 37 个和 16 个。其中,相对含量槲皮素-3-O-葡萄糖醛酸苷(49.99%)、飞燕草素-3-O-(6"-O- α -鼠李吡喃糖基- β -吡喃葡萄糖苷)(8.24%)、芦丁(7.45%)、表儿茶素(5.65%)位居前四。因此,BWE 展现出的良好体外抗氧化活性,可能与其富含多种结构多样的黄酮类化合物密切相关。作为一种潜在的天然抗氧化剂来源,BWE 在食品、抗衰老化妆品开发以及医药保健等领域展现出广阔的应用前景。未来研究应着重加强木棉花清热、利湿、解毒、止血功效的物质基础研究,探究其有效部位或单体化合物的药理活性与作用机制,并建立以有效成分为指标的质量控制方法,从而为木棉花的

临床应用及产品开发提供坚实的科学依据和理论支撑。

参考文献:

- [1] 王健, 水庆艳, 宋希强. 木棉 (*Bombax ceiba*) 名称辨析与栽培应用[J]. *热带作物学报*, 2009, 30(12): 1764–1769. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-2561.2009.12.010>
- [2] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志 第四十九卷 第二分册[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 106.
- [3] 包文龙, 冯俊华, 劳成景, 等. 木棉花提取物对酪氨酸酶抑制作用的研究[J]. *广东化工*, 2020, 48(14): 100–102.
- [4] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典 (一部)[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020.
- [5] Donipati R S, Subhasini P. Determining the antioxidant activity of *Bombax ceiba* flower extracts[J]. *International Journal for Pharmaceutical Research Scholars*, 2016, 5: 146–150.
- [6] 刘金泳, 邱素君, 陈芳超, 等. 木棉花水提取物抗炎镇痛作用的实验研究[J]. *广州医药*, 2018, 49(1): 5–8. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-8535.2018.01.002>
- [7] Yoshimi N, Matsunaga K, Katayama M, et al. The inhibitory effects of mangiferin, a naturally occurring glucosylxanthone, in bowel carcinogenesis of male F344 rats[J]. *Cancer Letters*, 2001, 163(2): 163–170. [https://doi.org/10.1016/S0304-3835\(00\)00678-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3835(00)00678-9)
- [8] Masood-ur-rehman, Akhtar N, Mustafa R. Antibacterial and antioxidant potential of stem bark extract of *Bombax ceiba* collected locally from south Punjab area of Pakistan[J]. *African Journal of Traditional, Complementary and Alternative Medicines*, 2017, 14(2): 9–15. <https://doi.org/10.21010/ajtcam.v14i2.2>
- [9] Saleem R, Ahmad M, Hussain S A, et al. Hypotensive, hypoglycaemic and toxicological studies on the flavonol C-glycoside shamimin from *Bombax ceiba*[J]. *Planta Medica*, 1999, 65(4): 331–334. <https://doi.org/10.1055/s-1999-14060>
- [10] Arafat A F, Foda D S, Mahmoud A H, et al. *Bombax ceiba* flowers extract ameliorates hepatosteatois induced by ethanol and relatively moderate fat diet in rats[J]. *Toxicology Reports*, 2019, 6: 401–408. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2019.04.008>
- [11] Patel S S, Verma N K, Rathore B, et al. Cardioprotective effect of *Bombax ceiba* flowers against acute adriamycin-induced myocardial infarction in rats[J]. *Revista Brasileira De Farmacognosia*, 2011, 21(4): 704–709. <https://doi.org/10.1590/S0102-695X2011005000090>
- [12] Hodgson J M. Effects of tea and tea flavonoids on endothelial function and blood pressure: a brief review[J]. *Clinical and Experimental Pharmacology and Physiology*, 2006, 33(9): 838–841. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1681.2006.04450.x>
- [13] Rathee P, Chaudhary H, Rathee S, et al. Mechanism of action of flavonoids as anti-inflammatory agents: a review[J]. *Inflammation & Allergy-Drug Targets (Discontinued)*, 2009, 8(3): 229–235. <https://doi.org/10.2174/187152809788681029>
- [14] 高中洪, 黄开勋, 徐辉碧. 黄芩中黄酮类生物活性的研究进展[J]. *中国药理学杂志*, 1998, 33(12): 705–707. <https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-2494.1998.12.001>
- [15] Vieira T O, Said A, Aboutabl E, et al. Antioxidant activity of methanolic extract of *Bombax ceiba*[J]. *Redox Report*, 2009, 14(1): 41–46.
- [16] Tundis R, Rashed K, Said A, et al. *In vitro* cancer cell growth inhibition and antioxidant activity of *Bombax ceiba* (Bombacaceae) flower extracts[J]. *Natural Product Communications*, 2014, 9(5): 69–694. <https://doi.org/10.1177/1934578X1400900527>
- [17] 唐微艳. 木棉花水提取物对人肺癌 NCI-H460 细胞体内外抑制作用及机制研究[D]. 南宁: 广西医科大学, 2019.
- [18] 徐源, 杨立军, 李冰洁, 等. 超声辅助双水相提取紫苏叶总黄酮工艺优化及其抗氧化活性分析[J]. *粮食与油脂*, 2025, 38(2): 158–162. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-9578.2025.02.026>
- [19] 魏瑞敬. 木棉花黄酮的提取分离及祛痘功效研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022. doi:10.27151/d.cnki.ghnl.2022.004380
- [20] 王斌, 王凤君, 梁颖琪, 等. 玫瑰纯露提取工艺优化及其抑菌和抗氧化活性研究[J]. *北方园艺*, 2020(18): 106–113. <https://doi.org/10.11937/bfy.20194233>
- [21] 黎楚楚, 徐霖, 林长松. 响应面优化黄姜花根多糖提取工艺及其抗氧化活性分析[J]. *饲料研究*, 2024, 47(11): 109–113. <https://doi.org/10.13557/j.cnki.issn1002-2813.2024.11.020>
- [22] 任曼妮, 王存堂, 唐旭华, 等. 黑豆皮多酚提取物抗氧化活性研究[J]. *食品与机械*, 2019, 35(10): 189–192. <https://doi.org/10.13652/j.issn.1003-5788.2019.10.038>
- [23] Want E J, Masson P, Michopoulos F, et al. Global metabolic profiling of animal and human tissues via UPLC-MS[J]. *Nature Protocols*, 2013, 8(1): 17–32. <https://doi.org/10.1038/nprot.2012.135>
- [24] Zelena E, Dunn W B, Broadhurst D, et al. Development of a robust and repeatable UPLC-MS method for the long-term metabolomic study of human serum[J]. *Analytical Chemistry*, 2009, 81(4): 1357–1364. <https://doi.org/10.1021/ac8019366>
- [25] He G Q, Xiong H P, Chen Q E, et al. Optimization of conditions for supercritical fluid extraction of flavonoids from hops (*Humulus lupulus* L.)[J]. *Journal of Zhejiang University Science B*, 2005, 6(10): 999–1004. <https://doi.org/10.1007/BF02888491>
- [26] 林庆景, 王志江, 杨旭, 等. 超声波辅助提取木棉花黄酮工艺[J]. *亚热带农业研究*, 2016, 12(3): 192–198. <https://doi.org/10.13321/j.cnki.subtrop.agric.res.2016.03.010>

- [27] 何秋彤. 凉茶抗氧化性能的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [28] Wanjari M M, Gangoria R, Dey Y N, et al. Hepatoprotective and antioxidant activity of *Bombax ceiba* flowers against carbon tetrachloride-induced hepatotoxicity in rats[J]. *Hepatoma Research*, 2016, 2: 144–150. <https://doi.org/10.20517/2394-5079.2015.55>
- [29] Yu Y G, He Q T, Yuan K, et al. *In vitro* antioxidant activity of *Bombax malabaricum* flower extracts[J]. *Pharmaceutical Biology*, 2011, 49(6): 569–576. <https://doi.org/10.3109/13880209.2010.529614>
- [30] 马琼. 木棉花化学成分研究及活性部位的抗糖尿病作用[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2016. <https://doi.org/10.7666/d.Y3026877>
- [31] Zhang Y B, Wu P, Zhang X L, et al. Phenolic compounds from the flowers of *Bombax malabaricum* and their antioxidant and antiviral activities[J]. *Molecules*, 2015, 20(11): 19947–19957. <https://doi.org/10.3390/molecules201119660>
- [32] Hait M, Goswami J. Physicochemical and phytochemical status on flower of *Bombax ceiba*[J]. *Journal of Medicinal Plants Studies*, 2017, 5(3): 189–192.
- [33] Joshi K R, Devkota H P, Yahara S. Chemical analysis of flowers of *Bombax ceiba* from Nepal[J]. *Natural Product Communications*, 2013, 8(5): 583–584. <https://doi.org/10.1177/1934578X1300800508>
- [34] El-hagrassi A M, Ali M M, Osman A F, et al. Phytochemical investigation and biological studies of *Bombax malabaricum* flowers[J]. *Natural Product Research*, 2011, 25(2): 141–151. <https://doi.org/10.1080/14786419.2010.518146>
- [35] Said A, Aboutabl E A, Nofal S M, et al. Phytoconstituents and bioactivity evaluation of *Bombax ceiba* L. flowers[J]. *Journal of Traditional Medicines*, 2011, 28(2): 55–62. <https://doi.org/10.11339/jtm.28.55>
- [36] Wu J, Zhang X H, Zhang S W, et al. Three novel compounds from the flowers of *Bombax malabaricum* [J]. *Helvetica Chimica Acta*, 2008, 91(1): 136–143. <https://doi.org/10.1002/hlca.200890004>
- [37] Kumar S M, Madhurambal G. Quercetagenin glycoside from the flowers of *Bombax ceiba*[J]. *Asian Journal of Research in Chemistry*, 2010, 3(1): 78–80.
- [38] Li A N, Li S, Li H B, et al. Total phenolic contents and antioxidant capacities of 51 edible and wild flowers[J]. *Journal of Functional Foods*, 2014, 6: 319–330. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2013.10.022>
- [39] Niranjana G S, Gupta P C. Anthocyanins from the flowers of *Bombax malabaricum*[J]. *Planta Medica*, 1973, 24(6): 196–199. <https://doi.org/10.1055/s-0028-1099488>
- [40] Sampiev A M, Nikiforova E B, Shevchenko A I. Flavonoids from leaves of *Ziziphus jujuba*[J]. *Pharmaceutical Chemistry Journal*, 2020, 54(8): 800–803. <https://doi.org/10.1007/s11094-020-02277-w>
- [41] Gunesch S, Soriano-castell D, Lamer S, et al. Development and application of a chemical probe based on a neuroprotective flavonoid hybrid for target identification using activity-based protein profiling[J]. *ACS Chemical Neuroscience*, 2020, 11(22): 3823–3837. <https://doi.org/10.1021/acscemneuro.0c00589>
- [42] Wu Y B, Zheng L J, Wu J G, et al. Antioxidant activities of extract and fractions from receptaculum nelumbinis and related flavonol glycosides[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2012, 13(6): 7163–7173. <https://doi.org/10.3390/ijms13067163>
- [43] Ho L, Ferruzzi M G, Janle E M, et al. Identification of brain-targeted bioactive dietary quercetin-3-O-glucuronide as a novel intervention for Alzheimer's disease[J]. *The FASEB Journal*, 2013, 27(2): 769–781. <https://doi.org/10.1096/fj.12-212118>
- [44] Derlindati E, Dall'asta M, Ardigò D, et al. Quercetin-3-O-glucuronide affects the gene expression profile of M1 and M2a human macrophages exhibiting anti-inflammatory effects[J]. *Food & Function*, 2012, 3(11): 1144–1152. <https://doi.org/10.1039/C2FO30127J>
- [45] 李玉山. 芦丁的资源、药理及主要剂型研究进展[J]. *氨基酸和生物资源*, 2013, 35(3): 13–16. <https://doi.org/10.14188/j.ajsh.2013.03.011>
- [46] Baby B, Antony P, Vijayan R. Antioxidant and anticancer properties of berries[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2018, 58(15): 2491–2507. <https://doi.org/10.1080/10408398.2017.1329198>
- [47] Jia N, Xiong Y L, Kong B H, et al. Radical scavenging activity of black currant (*Ribes nigrum* L.) extract and its inhibitory effect on gastric cancer cell proliferation via induction of apoptosis[J]. *Journal of Functional Foods*, 2012, 4(1): 382–390. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2012.01.009>
- [48] 童观珍, 付晓萍, 杨艳, 等. 表儿茶素的分布及药理活性研究进展[J]. *云南农业大学学报 (自然科学)*, 2018, 33(2): 343–349. [https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).201705044](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).201705044)
- [49] Shariati S, Kalantar H, Pashmforoosh M, et al. Epicatechin protective effects on bleomycin-induced pulmonary oxidative stress and fibrosis in mice[J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2019, 114: 108776. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2019.108776>
- [50] Li J W, Wang X Y, Zhang X, et al. (-)-Epicatechin protects against myocardial ischemia-induced cardiac injury via activation of the PTEN/PI3K/AKT pathway[J]. *Molecular Medicine Reports*, 2018, 17(6): 8300–8308. <https://doi.org/10.3892/mmr.2018.8870>

Antioxidant activity and LC-MS component analysis of water extracts from the flowers of *Bombax ceiba*

Liu Weiwei[#], Cai Zeping, Luo Can, Wang Tongxin, Xiao Xian, Yu Xudong^{*}

(School of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University/Ministry of Education Key Laboratory for Genetic and Germplasm Innovation in Tropical Trees and Flowers/Key Laboratory of Biological Resources of Tropical Characteristic Ornamental Plants, Danzhou, Hainan 571737, China)

Abstract: To explore the potential of the aqueous extract of *Bombax ceiba* flower (BWE) in the field of antioxidation, the effects of different solid-liquid ratios and decoction times on the total flavonoid content and in vitro antioxidant indices such as DPPH radical scavenging rate, ABTS cation radical scavenging rate, and Fe^{3+} reducing ability of the extract were investigated. The optimal process parameters of solid-liquid ratio and decoction time were screened out. Subsequently, the chemical components of BWE were identified and analyzed by using liquid chromatography-mass spectrometry (LC-MS) to provide key scientific basis for the development and application of BWE in the field of antioxidation. The results showed that within a certain range, the scavenging ability of BWE on DPPH and ABTS radicals and the reducing ability of Fe^{3+} increased with the concentration. The optimal parameters were a solid-liquid ratio of 1:12.5 and a decoction time of 1.5 h, with IC_{50} values being $87.44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $46.77 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. However, the Fe^{3+} reducing ability of BWE was higher than that of vitamin C. These results indicated that BWE had high antioxidant activity. A total of 73 flavonoids were identified in BWE, among which four chemical components in BWE, i.e. quercetin 3-O-glucuronide (49.99%), delphinidin-3-O-(6"-O-alpha-rhamnopyranosyl-beta-glucopyranoside) (8.24%), rutin (7.45%), and galocatechin (5.65%), were the highest in relative content and are important pharmacologically active substances. This provides a theoretical basis for further in-depth exploration and utilization of the medicinal potential of flavonoids in BWE.

Keywords: *Bombax ceiba*; water extract; antioxidant activity; chemical composition; liquid chromatography-mass spectrometry

(责任编辑: 潘学峰)