

陈晓兰, 圣志存, 陈海峰, 等. 泡桐花多糖的体内外抗氧化活性 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(7): 349–353. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020050373

CHEN Xiaolan, SHENG Zhicun, CHEN Haifeng, et al. Antioxidant Activity *in Vitro* and *Vivo* of Polysaccharide from *Paulownia fortunei* Flower[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(7): 349–353. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020050373

· 营养与保健 ·

泡桐花多糖的体内外抗氧化活性

陈晓兰, 圣志存, 陈海峰, 贾纪萍, 李冉, 罗丹, 陈未, 冒玉娟
(江苏农牧科技职业学院, 江苏泰州 225300)

摘要: 以泡桐花为原料水提醇沉法制备多糖, 测定泡桐花多糖的体外、体内抗氧化活性。体外抗氧化测定结果显示, 泡桐花多糖对超氧阴离子、羟基自由基清除以及抑制 H₂O₂溶血有较好的效果, 呈剂量依赖性; 质量浓度 0.5 mg/mL 时, 对超氧阴离子和羟基自由基清除率分别达到 54.36%, 74.62%, 超过半数效应 50%; 质量浓度 2 mg/mL 时, 抗 H₂O₂氧化溶血率超过阳性对照组 Vc (1 mg/mL)。体内抗氧化测定结果显示, 泡桐花多糖低、中、高 (日剂量 5、10、20 mg/mL, 0.2 mL) 小鼠灌胃 28 d 对体质量无影响; 血清和心脏、肝脏、肾脏、回肠脏器超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD)、还原型谷胱甘肽 (glutathione, GSH)、丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 含量和总抗氧化能力 (total antioxidant capacity, T-AOC) 检测表明, 与空白组相比, 不同剂量的泡桐花多糖能够增加或显著增加 SOD、GSH 含量和 T-AOC 水平 ($P<0.05$), 同时降低 MDA 含量, 并存在一定的量效关系。研究表明泡桐花多糖具有良好的抗氧化活性, 可作为天然抗氧化剂应用于食药工业。

关键词: 泡桐花多糖, 体外, 体内, 抗氧化

中图分类号: TS218

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2021)07-0349-05

DOI: [10.13386/j.issn1002-0306.2020050373](https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020050373)

Antioxidant Activity *in Vitro* and *Vivo* of Polysaccharide from *Paulownia fortunei* Flower

CHEN Xiaolan, SHENG Zhicun, CHEN Haifeng, JIA Jiping, LI Ran, LUO Dan, CHEN Wei, MAO Yujuan

(Jiangsu Agri-animal Husbandry Vocational College, Taizhou 225300, China)

Abstract: This study aimed at evaluating the antioxidant activity *in vitro* and *vivo* of polysaccharide prepared from *Paulownia fortunei* flower by water extract-alcohol precipitation. *In vitro*, results showed that *Paulownia fortunei* flower polysaccharide had a dose-dependent and good effect on scavenging superoxide anion, hydroxyl radical and inhibiting H₂O₂ hemolysis. When the concentration of polysaccharide controlled at 0.5 mg/mL, the scavenging rates of superoxide anion and hydroxyl radical were 54.36% and 74.62% respectively, with more than half effect of 50%. When at 2 mg/mL, the anti-H₂O₂ oxidation hemolysis rate was higher than that of the positive control Vc group (1 mg/mL). *In vivo*, after the experimental mice were administered to oral gavage with *Paulownia* flower polysaccharide at low, medium and high dosages (5, 10 and 20 mg/mL, 0.2 mL) for 28 consecutive days. The result showed that *Paulownia fortunei* flower polysaccharide had no effect on weight of mice; different doses of polysaccharide could enhance or significantly enhance the content of superoxide dismutase (SOD), glutathione (GSH), total antioxidant capacity (T-AOC) remarkably in serum, heart, liver, kidney, ileum ($P<0.05$) when compared with that of the blank group, and reduce the malondialdehyde (MDA) content dramatically with a certain concentration-response relationship. The results indicate that *Paulownia fortunei* flower polysaccharide had perfect antioxidant activity and could be used as a natural antioxidant in food and medicine industry.

Key words: *Paulownia fortunei* flower polysaccharide; *in vitro*; *in vivo*; antioxidant

收稿日期: 2020-06-01

基金项目: 国家自然科学基金 (31702286); 2018 年江苏高校“青蓝工程”优秀骨干教师培养项目; 江苏农牧科技职业学院国家自然科学基金配套项目 (NSFPT201801)。

作者简介: 陈晓兰 (1979-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 天然药物化学, E-mail: cxl7972563@163.com。

泡桐(*Paulownia fortunei*), 又名白花泡桐、大果泡桐, 空桐木等, 隶属玄参科(Scrophulariaceae)泡桐属(*Paulownia*), 属于落叶乔木, 广泛分布我国各地, 其药用价值从古代就有记载^[1], 且叶、花、果实均可作药用, 民间常煎煮用于治疗肺热咳嗽、疖肿、疮疖等病证。泡桐花, 泡桐植物常作药用部位之一, 春季花开时采收, 晒干或鲜用。现代医药研究表明, 泡桐花含有丰富的多糖、黄酮、生物碱、皂苷、有机酸、挥发油、酚类及鞣质类成分等有益人体的生物活性物质^[2], 具有抗炎^[3]、抑菌^[4]、调节免疫^[5]等作用。当前, 关于泡桐花的营养药用价值, 国内外众多研究者做了相关深入研究, 但大多集中于泡桐花的化学或营养成分^[4,6-7]、黄酮的提取工艺^[8]或含量测定^[9]; 而有关生物活性方面, 免疫活性方面研究则较多^[6,10-11], 鲜见有关泡桐花多糖及其抗氧化活性方面的研究报道。

多糖是多羟基醛和多羟基酮通过糖苷键连接的高分子聚合物, 具有抗氧化、调节免疫等诸多有益生理活性, 是功能食品基料的主要来源之一^[12]。因此有必要对泡桐花多糖体外、体内的抗氧化功能进行全面系统研究。

本研究以泡桐花多糖为研究对象, 通过超氧阴离子、羟自由基清除能力以及抗 H₂O₂ 氧化溶血率测定评价体外抗氧化活性。以小鼠为试验动物, 通过体内抗氧化活性试验, 测定泡桐花多糖对小鼠血清及心、肝、肾、回肠组织器官的 SOD、GSH、MDA 含量以及 T-AOC 水平的影响, 以期为泡桐花资源深层探索提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

泡桐花 扬中牧乐药业有限公司提供; 邻苯三酚(AR)、邻二氮菲(AR) 北京索莱宝科技有限公司; Vc(AR, ≥99%)、硫酸亚铁(AR) 国药集团化学试剂有限公司; SOD、GSH、T-AOC、MDA ELISA 试剂盒 合肥莱尔生物科技有限公司; ICR 小鼠(体重 18~22 g) 扬州大学比较医学中心, 动物生产许可证号: SCXK(苏)2012-0004。

T-500B 高速多功能粉碎机 永康市哈瑞工贸有限公司; BSA223S-CW 电子天平 德国赛多利斯公司; UV-2400 紫外可见分光光度计 北京世纪科信科学仪器有限公司; Anthos 2010 酶标仪 上海鼎谦生物科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 体外抗氧化试验

1.2.1.1 泡桐花多糖的提取与溶液制备 晒干泡桐花, 机械粉碎过 60 目标准筛。取适量粉末样品, 按料液比 1:30(g/mL), 70 ℃ 水浴提取 2 h。反应结束, 过滤去渣, 滤液真空减压浓缩之反应前体积的十分之一, 加入 3 倍体积的 95% 乙醇, 醇沉过夜, 离心得沉淀, 即为粗多糖^[13]。沉淀蒸馏水复溶, 苯酚硫酸

法^[14]测定多糖含量(≥70%), 稀释配制成 0.5、1.0、2.0 mg/mL 的多糖溶液, 待测。

1.2.1.2 超氧阴离子自由基清除能力测定 超氧阴离子自由基清除测定采用邻苯三酚自氧化法^[15]。

1.2.1.3 羟基自由基清除能力测定 羟基自由基清除测定采用邻二氮菲-Fe²⁺氧化法^[16]。

1.2.1.4 抗 H₂O₂ 氧化溶血率测定 ICR 小鼠眼球采血, 肝素抗凝, 4 ℃, 3000 r/min 离心, 收集红细胞, 生理盐水洗涤 3 次, 制成 0.5% 红细胞悬浮液。取试管 48 支, 分为泡桐花多糖样品组、空白组和本底对照组以及 Vc 对照组。取 0.5% 红细胞悬液 4.0 mL, 依次加入不同浓度泡桐花多糖 4.0 mL, 50 mmol/LH₂O₂ 2.0 mL, 混匀, 37 ℃ 水浴反应 1 h, 加生理盐水 16 mL, 3000 r/min 离心 5 min, 取上清液紫外分光光度计测定 415 nm 处吸光度值, 计算氧化溶血抑制率。

$$\text{氧化溶血抑制率} = [A_0 - (A_1 - A_2)] / A_0 \times 100$$

式中: A₀ 表示空白对照组吸光度(生理盐水代替泡桐花提取液), A₁ 表示样品组吸光度; A₂ 表示样品本底吸光度(蒸馏水代替红细胞悬浮液)。

1.2.2 体内抗氧化试验 将 50 只 ICR 小鼠预饲养 7 d 后随机分成 5 组, 即空白对照(BC)组、泡桐花多糖低(PFFP-L)、中(PFFP-M)、高剂量(PFFP-H)组、Vc 对照组, 每组 10 只, 雌雄分开饲养。其中, 泡桐花多糖组小鼠低、中、高剂量依据前期免疫预实验, 控制每天灌胃剂量分别为 5、10、20 mg/mL 泡桐花多糖溶液 0.2 mL, 等量体积蒸馏水、Vc(1 mg/mL)分别作为空白和阳性对照。实验期间, 小鼠自由摄食和饮水, 灌胃 30 d 后, 禁食 12 h, 眼球采血, 立即 37 ℃ 静置 2 h, 4 ℃ 过夜, 于 4 ℃, 3000 r/min 离心 10 min, 分离血清, 待测。采血后的小鼠处死解剖, 取出心、肝、肾、回肠于预冷的生理盐水漂洗, 除去血液, 滤纸吸干表面水分, 各组织器官与生理盐水按 1:9 的比例低温匀浆, 制备匀浆液, 3000 r/min 离心 10 min, 留上清液, 待测。

1.2.3 指标测定 a. 体重变化: 分别于给药后的 0、7、14、21 和 28 d 称重, 称重前禁食 12 h。比较各组体重的变化。b. 抗氧化活性测定: 以各组小鼠血清、心脏、肝脏、肾脏、回肠为试验样品, 严格按照试剂盒说明书进行 SOD、GSH、MDA 含量以及 T-AOC 指标测定。

1.3 数据处理

所有测定结果均重复 3 次, 以平均值±标准差表示; 采用 SPSS 21.0 ANOVA 对数据进行方差分析, Duncan 法进行多重比较, 以 P<0.05 表示有统计学差异。

2 结果与讨论

2.1 体外抗氧化试验

不同浓度泡桐花多糖溶液体外抗氧化指标测定如表 1 所示。由表 1 可知, 不同剂量的泡桐花多糖

表 1 泡桐花多糖体外抗氧化指标测定

Table 1 Determination of antioxidant indexs *in vitro* of *Paulownia fortune* flower polysaccharide

组别	浓度(mg/mL)	超氧阴离子自由基清除率(%)	羟基自由基清除率(%)	抗H ₂ O ₂ 氧化溶血率(%)
低剂量	0.5	54.36±0.57 ^d	74.62±1.46 ^c	6.96±0.29 ^c
中剂量	1	70.74±1.82 ^c	87.33±1.36 ^b	12.704±0.43 ^b
高剂量	2	81.10±2.20 ^b	93.65±2.09 ^a	15.97±1.04 ^a
Vc	1	91.18±2.25 ^a	77.56±2.40 ^c	12.38±0.54 ^b

注: 同一指标不同小写字母表示差异显著, $P<0.05$ 。

溶液对超氧阴离子、羟基自由基清除率以及抗H₂O₂氧化溶血率指标均呈剂量依赖型。泡桐花多糖浓度为0.5 mg/mL时, 超氧阴离子、羟基自由基清除率分别为54.36%、74.62%, 均大于半数效应50%; 多糖浓度为1 mg/mL时, 羟基自由基清除率超过Vc对照组(1 mg/mL); 多糖浓度为2 mg/mL时, 抗H₂O₂氧化溶血率超过阳性对照组Vc(1 mg/mL)。自由基学说认为生物体的衰老和各种疾病的过程是机体的组织细胞不断产生的自由基积累结果, 自由基可以引起细胞中的多种物质发生氧化, 损害生物膜, 还能够使蛋白质、核酸等大分子交联, 影响其正常功能^[17]。目前已经证实, 清除多余自由基的能力是机体内本身所具备的, 正常情况下, 人体内存在过氧化氢酶(CAT)、SOD、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)等一些抗氧化酶类和抗氧化剂, 使自由基的生成和清除处于动态平衡^[18~19]; 但人体随着年龄的增长或处于高负荷运动等不利环境条件时, 会引起过多的自由基生成, 从而导致自由基形成与消除失衡, 使机体组织受损^[20]。研究表明, 适当补充抗氧化剂可以减缓自由基氧化机体带来的危害, 因此, 寻找有效清除自由基的抗氧化食药资源对人类健康具有重要意义。泡桐花多糖部分体外抗氧化指标测定结果与Vc相当, 可能

预示泡桐花多糖是一种极具价值的亟待开发天然抗氧化剂, 值得进一步探索利用。

2.2 体内抗氧化试验

2.2.1 泡桐花多糖对小鼠体重的影响 因雌雄小鼠体重和生长速度有差异, 因此雌雄小鼠进行分开统计。泡桐花多糖对小鼠体重的影响结果如表2、表3所示。结果表明, 雌雄小鼠给药前及给药后的4个时间点, 各给药组之间小鼠体重均无显著性差异($P>0.05$), 因此认为泡桐花多糖样品对小鼠体质质量无影响。

2.2.2 泡桐花多糖对小鼠血清和组织器官中SOD的影响 SOD是需氧生物体内上千种酶中唯一以氧自由基为底物的酶, 对底物有绝对的专一性, 它能催化H⁺和O₂相结合生成H₂O₂, 因而SOD含量水平的高低可作为机体评价抗氧化能力的标志^[21~22]。如图1所示, 与空白组对比可知, 泡桐花多糖中、高剂量组能显著增加血清SOD含量($P<0.05$), 分别增加了226.63%、149.07%, 且中、高剂量酶含量接近Vc; 低剂量则与空白组无显著差异($P>0.05$)且显著低于Vc对照组($P<0.05$)。组织器官SOD含量, 与空白组对比, 泡桐花多糖低剂量组SOD含量普遍略高于空

表 2 泡桐花多糖对雌性小鼠体重的影响(n=5)

Table 2 Effect of *Paulownia fortune* flower polysaccharide on the weights of female mice (n=5)

组别	浓度(mg/mL)	小鼠体重(g)				
		D ₀	D ₇	D ₁₄	D ₂₁	D ₂₈
空白组	-	20.10±0.87	24.88±0.96	26.66±1.02	28.24±1.64	29.94±1.68
低剂量	5	19.40±0.79	24.36±1.80	25.86±2.41	26.90±1.77	28.42±1.36
中剂量	10	20.14±1.25	24.58±1.67	28.16±1.97	28.30±1.66	28.96±3.39
高剂量	20	19.98±1.22	24.70±1.07	27.24±0.63	27.66±1.16	29.24±2.08
Vc	10	19.36±1.04	24.42±2.31	26.78±2.74	27.50±2.97	28.72±3.04

表 3 泡桐花多糖对雄性小鼠体重的影响(n=5)

Table 3 Effect of *Paulownia fortune* flower polysaccharide on the weights of male mice (n=5)

组别	浓度(mg/mL)	小鼠体重(g)				
		D ₀	D ₇	D ₁₄	D ₂₁	D ₂₈
空白组	-	20.42±1.40	26.98±2.74	32.10±3.14	34.12±3.72	35.70±3.49
低剂量	5	21.28±1.05	26.68±0.90	32.34±1.43	34.46±1.82	36.34±2.13
中剂量	10	21.62±0.34	26.36±2.38	28.98±3.26	31.32±2.89	32.58±3.29
高剂量	20	21.04±1.38	27.32±1.01	31.52±1.72	33.74±2.27	35.50±2.86
Vc	10	20.16±0.89	27.04±1.47	30.98±2.25	32.96±2.16	34.74±2.28

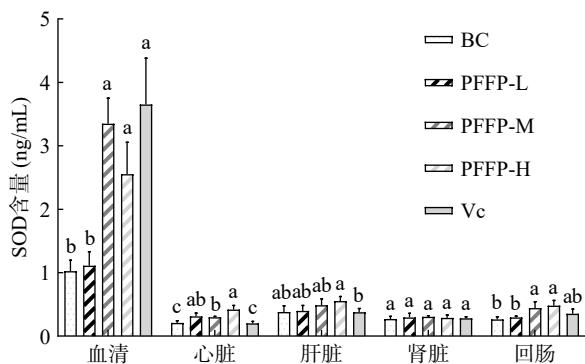


图 1 泡桐花多糖对小鼠血清和组织器官中 SOD 的影响(n=4)

Fig.1 Effect of *Paulownia fortune* flower polysaccharide on SOD in the serum and tissues of mice (n=4)

注: 同一指标不同小写字母表示差异显著, $P<0.05$;

图 2~图 4 同。

白组,但仅心脏有显著差异($P<0.05$)。中、高剂量组心脏、回肠组织器官含量均显著增加($P<0.05$);中剂量组分别增加了 42.38%、68.32%;高剂量组分别增加了 99.05%、83.59%($P<0.05$);肝脏、肾脏含量则差异变化不显著($P>0.05$)。

2.2.3 泡桐花多糖对小鼠血清和组织器官 GSH 的影响

GSH 是机体内最重要的非酶性过氧化物,可以保护细胞中蛋白质分子的巯基(-SH)免遭氧化,同时具有清除活性氧、 H_2O_2 、LOOH 等自由基作用,因而 GSH 量的多少是衡量机体抗氧化能力大小的重要因素^[23~24]。如图 2 所示,与空白组对比,泡桐花多糖低、中、高剂量组均能增加血清中 GSH 含量,且呈剂量依赖型,但均低于 Vc 对照组。组织器官 GSH 含量测定结果显示,泡桐花多糖低、中、高剂量含量均高于空白组。与空白组相比,低剂量组肝脏、回肠 GSH 显著($P<0.05$)增加,分别增加了 60.03%、69.40%;中、高剂量组心脏、肝脏、回肠差异均显著($P<0.05$),中剂量分别增加了 55.31%、104.89%、70.43%;高剂量分别增加了 110.62%、135.49%、163.52%,且高剂量组显著高于 Vc($P<0.05$);所有剂量组肾脏中 GSH 量增加但不显著($P>0.05$)。

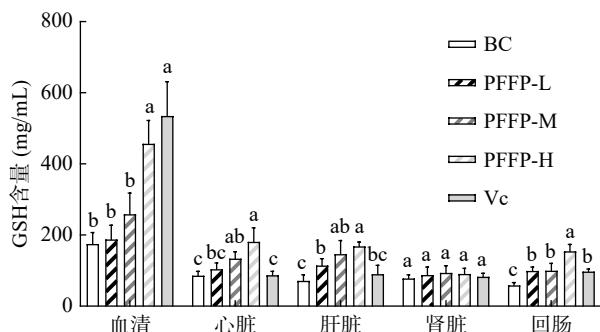


Fig.2 Effect of *Paulownia fortune* flower polysaccharide on GSH in the serum and tissues of mice (n=4)

2.2.4 泡桐花多糖对小鼠血清和组织器官 MDA 的影响 MDA 是由自由基与多不饱和脂肪酸反应形成过氧自由基和过氧化脂质,两者代谢合成 MDA, 常用的膜脂过氧化指标,因此,通过主要末端产物 MDA 的含量的检测可以反映机体脂质过氧化和受损的程度^[25~26]。如图 3 所示,与空白组相比,泡桐花多糖血清低、中、高和 Vc 对照组均能显著降低 MDA 含量($P<0.05$),分别降低了 56.50%、61.73%、62.13%、65.12%。心脏组织所有剂量组 MDA 含量均显著降低($P<0.05$);其他组织器官实验组,仅有肾脏中、高剂量和回肠高剂量组显著降低($P<0.05$),分别降低了 33.73%、34.92%、25.80%。但同时发现,泡桐花多糖血清和所有脏器组织 MDA 含量并未随给药剂量的增加而呈剂量依赖显著降低,各低、中、高剂量组间差异无显著变化($P>0.05$)。

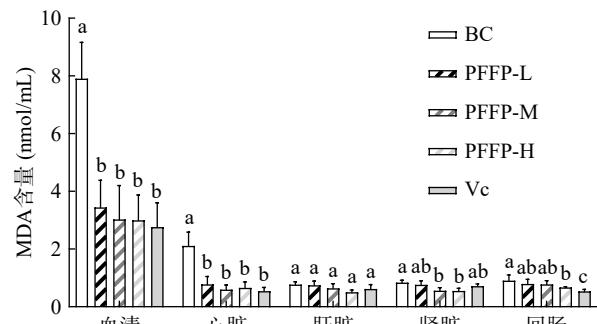


图 3 泡桐花多糖对小鼠血清和组织器官 MDA 的影响(n=4)

Fig.3 Effect of *Paulownia fortune* flower polysaccharide on MDA in the serum and tissues of mice (n=4)

2.2.5 泡桐花多糖对小鼠血清和组织器官中 T-AOC 的影响 机体的抗氧化防御途径主要有消除自由基和活性氧、分解过氧化物、除去催化作用的金属离子,包括酶促与非酶促两个体系部分,两者构成总抗氧化水平^[27~28]。酶促体系主要包括 SOD、GSH-Px、CAT、谷胱甘肽 S-转移酶(GST)等抗氧化酶^[29];非酶促反应体系中主要为维生素、氨基酸和金属蛋白^[30]。如图 4 所示,泡桐花多糖高、中剂量均能显著

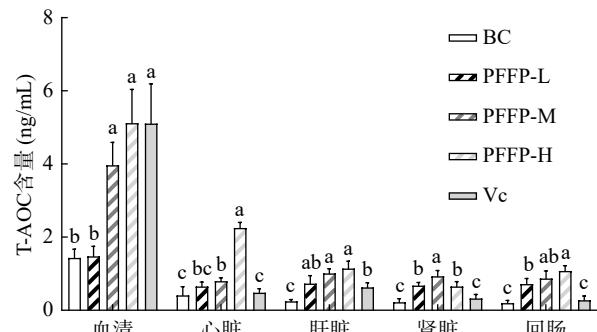


图 4 泡桐花多糖对小鼠血清和组织器官 T-AOC 水平的影响(n=4)

Fig.4 Effect of *Paulownia fortune* flower polysaccharide on T-AOC in the serum and tissues of mice (n=4)

增加血清和各个组织器官 T-AOC 水平($P<0.05$), 且组织器官高于阳性对照组 Vc; 血清则高剂量效果与 Vc 相当。与空白组相比, 低剂量组仅肝脏、肾脏、回肠表现差异显著($P<0.05$), 血清和心脏则不显著($P>0.05$)。综合而言, 灌胃一定剂量的泡桐花多糖样品, 小鼠血清和主要脏器的总抗氧化能力均能显著增加, 证实泡桐花多糖资源值得进一步挖掘利用。

3 结论

对泡桐花水提醇沉多糖的体内外抗氧化作用进行了较为系统的评价。体外抗氧化实验结果表明, 泡桐花多糖对超氧阴离子、羟基自由基、抗 H_2O_2 溶血率均有较为显著的清除或抑制作用。多糖浓度为 0.5 mg/mL 时, 泡桐花多糖对超氧阴离子、羟基自由基指标结果强于阳性对照 Vc; 2 mg/mL 时, 泡桐花多糖抗 H_2O_2 溶血率超过阳性对照 Vc(1 mg/mL)。体内抗氧化实验表明, 泡桐花多糖能够提高小鼠血清、心脏、肝脏、肾脏、回肠组织 SOD 和 GSH 含量、T-AOC 水平和降低 MDA 含量, 且呈一定的剂量依赖性, 说明泡桐花多糖具有良好的体内抗氧化作用, 可作为新型天然抗氧化剂探索应用于医药保健、功能食品等领域。

参考文献

- [1] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志 [M]. 北京: 科学出版社, 1979, 67(2): 28.
- [2] 钱建中, 张雨梅, 丁丽军. 泡桐花的活性成分及其药理作用综述[J]. 江苏农业科学, 2013, 41(5): 7–9.
- [3] Zhang J K, Li M, Li M, et al. Four C-geranyl flavonoids from the flowers of studies on the constituents of flowers. VIII. On the components of the flower of *Paulownia tomentosa* STEUDEL and their anti-inflammatory activity[J]. Natural Product Research, 2019, 2: 1–10.
- [4] 王婷. 兰考泡桐花活性成分研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2015:58.
- [5] Wang Q J, Meng X Y, Zhu L, et al. A polysaccharide found in *Paulownia fortunei* flowers can enhance cellular and humoral immunity in chickens[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 130: 213–219.
- [6] Kurihara T, Kikuchi M. Studies on the constituents of flowers. VIII. On the components of the flower of *Paulownia tomentosa* STEUDEL[J]. *Yakugaku Zasshi*, 1978, 98(4): 541–544.
- [7] 崔令军, 王保平, 乔杰, 等. 泡桐花营养成分分析评价[J]. 食品工业科技, 2014, 35(24): 338–341.
- [8] 张青青. 泡桐花总黄酮提取工艺的研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014:33.
- [9] Chen J, Liu Y, Shi Y P. Determination of flavonoids in the flowers of *Paulownia tomentosa* by high-performance liquid chromatography[J]. Journal of Analytical Chemistry, 2009, 64(3): 282–288.
- [10] 张苏倩. 泡桐花黄酮对小鼠免疫功能的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014:25.
- [11] Yang H F, Zhang P, Xu X Z, et al. The enhanced immunological activity of *Paulownia tomentosa* flower polysaccharide on Newcastle disease vaccine in chicken[J]. Bioscience Reports, 2019, 39(5): 1–9.
- [12] 圣志存, 吴双, 王安平, 等. 珊瑚菌子实体和菌丝体营养成分与抗氧化活性的比较[J]. 现代食品科技, 2018, 34(5): 62–67, 40.
- [13] 聂琳然, 郝利民, 王滔滔, 等. 不同来源红缘拟层孔菌粗多糖的抗氧化活性[J]. 食品科学, 2019, 40(19): 60–68.
- [14] Dubois M, Gilles K A, Hamilton J K, et al. Colorimetric method for determination of sugars and related substances[J]. Analytical Chemistry, 1956, 28(3): 350–356.
- [15] Hao L M, Sheng Z C, Lu J K, et al. Characterization and antioxidant activities of extracellular and intracellular polysaccharides from *Fomitopsis pinicola*[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 141(6): 54–59.
- [16] 刘薇, 刘雯佳, 刘彦霞, 等. 邻二氮菲-Fe³⁺法测定保健食品中水溶性成分的抗氧化能力[J]. 食品科学, 2011, 32(16): 261–264.
- [17] Denham H. Aging: A theory based on free radical and radiation chemistry[J]. Journal of Gerontology, 1956, 11(3): 298–300.
- [18] Vanessa S D O, Ivanilda M A, Marcos V D C B, et al. Aroeira fruit (*Schinus terebinthifolius* Raddi) as a natural antioxidant: Chemical constituents, bioactive compounds and *in vitro* and *in vivo* antioxidant capacity[J]. Food Chemistry, 2020, 31: 12764.
- [19] 朴香兰. 常见天然抗氧化物质研究 [M]. 北京: 中央民族大学出版社, 2008: 1–4.
- [20] 圣志存, 郝利民, 陶如玉, 等. 红缘拟层孔菌发酵物体外抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(13): 129–133.
- [21] 赵建, 李想, 鲁政, 等. 影响超氧化物歧化酶活性测定的因素[J]. 食品科学, 2010(9): 216–218.
- [22] 刘梦杰, 王飞, 张燕, 等. 黄芩多糖的体内抗氧化活性[J]. 中国食品学报, 2016, 16(7): 52–58.
- [23] 梁勇, 陈月星, 赵丽那, 等. 硒酸钠对不同麦类作物谷胱甘肽过氧化物酶活性的影响 [J]. 西南农业学报, 2017, 30(7): 1511–1515.
- [24] 张吉. 谷胱甘肽及其酶系统与 6-OHDA 氧化损伤的相关性研究 [D]. 南京: 南京医科大学, 2005:68.
- [25] 周麟依, 孙玉凤, 吴非. 丙二醛氧化对米糠蛋白结构及功能性质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(12): 98–107.
- [26] Bartolome B, Davalos A, Lopez F R, et al. Antioxidant activity of peptides derived from egg white proteins by enzymatic hydrolysis[J]. Journal of Food Protection, 2004, 67(9): 1939–1944.
- [27] 贾曼, 陈华, 陈际达, 等. 糖自氧化及抗氧化剂对其抑制作用的研究进展[J]. 化学通报, 2013, 76(3): 231–237.
- [28] 吕双双, 李书国. 植物源天然食品抗氧化剂及其应用的研究[J]. 粮油食品科技, 2013, 21(5): 60–65.
- [29] 林谦, 邱磊, 云龙, 等. 核因子 E2 相关因子 2 调控机体抗氧化途径特性及其与畜禽的健康和肉品质的关系 [J]. 动物营养学报, 2014, 26(6): 1421–1429.
- [30] 明建华, 叶金云, 张易祥, 等. 姜黄素对草鱼生长性能、抗氧化应激能力及核因子 E2 相关因子 2/抗氧化反应元件信号通路相关基因表达的影响[J]. 动物营养学报, 2019, 31(2): 809–823.