

杜仲不同部位营养成分及体外抗氧化活性分析

王婷婷¹ 胡 萍² 常迎双¹

(1. 河南工业大学漯河工学院, 河南 漯河 462002; 2. 许昌职业技术学院园林与食品工程学院, 河南 许昌 461000)

摘要: [目的] 研究杜仲不同部位的营养成分和体外抗氧化能力。[方法] 参照国标方法测定不同部位的蛋白质、脂肪、灰分、维生素 C、多糖、黄酮以及绿原酸的含量; 采用 ABTS⁺ 自由基清除法、DPPH 自由基清除法和总还原力法评估不同部位杜仲的抗氧化活性。[结果] 杜仲不同部位之间的基本营养素含量均存在统计学差异 ($P < 0.05$), 叶中的灰分和脂肪含量最高, 分别为 13.65, 6.19 g/100 g; 雄花中的蛋白质和维生素 C 含量最高, 分别为 20.8, 13.9 g/100 g; 杜仲叶中的总黄酮、绿原酸以及多糖含量最高, 分别为 2.45, 1.61, 1.27 g/100 g。体外抗氧化活性结果表明, 杜仲雄花的总还原能力最大, 其 IC₅₀ 值为 10.2 μ g/mL; 杜仲叶的 ABTS⁺ 自由基清除能力和 DPPH 自由基清除能力最大, 其 IC₅₀ 值分别为 11.19, 11.40 μ g/mL。隶属函数法综合评价结果表明, 杜仲叶的抗氧化效果最好, 杜仲皮的抗氧化效果最弱。[结论] 杜仲树皮、叶及雄花的营养价值及抗氧化性存在差异, 杜仲叶作为药食同源物质在未来食品原料的开发利用方面具有一定的营养学价值。

关键词: 杜仲; 不同部位; 营养成分; 隶属函数法; 抗氧化活性

Analysis of nutritional components and *in vitro* antioxidant activities in different parts of *Eucommia ulmoides*

WANG Tingting¹ HU Ping² CHANG Yingshuang¹

(1. Luohe Institute of Technology, Henan University of Technology, Luohe, Henan 462002, China; 2. School of Landscape and Food Engineering, Xuchang Vocational Technical College, Xuchang, Henan 461000, China)

Abstract: [Objective] To study the nutritional components and *in vitro* antioxidant activities in different parts of *Eucommia ulmoides*. [Methods] The content of protein, fat, ash, vitamin C, polysaccharides, flavonoids, and chlorogenic acid in different parts of *E. ulmoides* is determined according to the methods specified in national standards. The antioxidant activities of different parts of *E. ulmoides* are evaluated based on the ABTS⁺ free radical scavenging ability, DPPH free radical scavenging ability, and total reducing power. [Results] There are statistical differences in the content of essential nutrients among different parts of *E. ulmoides* ($P < 0.05$). The ash content and fat content are the highest in the leaves, reaching 13.65 and 6.19 g/100 g, respectively. The protein content and Vc content are the highest in male flowers, reaching 20.8 and 13.9 g/100 g, respectively. The total flavonoids, chlorogenic acid, and polysaccharides are the highest in the leaves, reaching 2.45, 1.61, and 1.27 g/100 g, respectively. The results of *in vitro* antioxidant activity assay show that male flowers have the highest total reducing power, with the IC₅₀ of 10.2 μ g/mL. The leaves have the highest ABTS⁺ free radical scavenging ability and DPPH free radical scavenging ability, with IC₅₀ being 11.19 and 11.40 μ g/mL, respectively. The comprehensive evaluation results of membership function method show that the antioxidant effect of the leaves is the best, and that of the cortex is the weakest. [Conclusion] The nutritional value and antioxidant properties of *E. ulmoides* vary among cortex, leaves, and male flowers. *E. ulmoides* leaves with both edible and medicinal properties demonstrate certain nutritional value in the development and utilization of food raw materials in the future.

Keywords: *Eucommia ulmoides*; different parts; nutritional component; membership function method; antioxidant activity

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目 (编号: 22B550012)

通信作者: 王婷婷 (1981—), 女, 河南工业大学漯河工学院副教授, 硕士。E-mail: 541144845@qq.com

收稿日期: 2024-10-15 改回日期: 2025-08-20

引用格式: 王婷婷, 胡萍, 常迎双. 杜仲不同部位营养成分及体外抗氧化活性分析[J]. 食品与机械, 2025, 41(9): 161-168.

Citation: WANG Tingting, HU Ping, CHANG Yingshuang. Analysis of nutritional components and *in vitro* antioxidant activities in different parts of *Eucommia ulmoides*[J]. Food & Machinery, 2025, 41(9): 161-168.

杜仲为中国特有的珍贵药材,最早记录于《神农本草经》,已经被认可和使用了至少 2 000 年。《本草纲目》《中国药典》也对其进行了详细记载^[1-2]。杜仲的传统用药部位为树皮,2014 年杜仲雄花被列为新资源食品原料,2023 年杜仲叶也被正式纳入药食同源目录。研究^[3]发现,杜仲中含有丰富的活性成分和营养成分,杜仲叶、皮、雄花则有相似的化学成分和药理作用。从杜仲的皮、叶、种子、花等部位已分离出 205 种化合物^[4],具有降血压、降血糖、抗衰老、抗氧化、抑制肿瘤等健康功效^[5]。杜仲中抗氧化成分较多,如环烯醚萜类化合物、酚类化合物、苯丙素类化合物、木质素类化合物等^[6-7],具有一定的清除 $\cdot\text{OH}$ 、 $\text{O}_2\cdot^-$ 、 NO_2^- 和还原能力。近年来,基于杜仲的药食同源价值,以杜仲皮、叶、雄花为原料开发了多样化的杜仲产品,为杜仲资源的开发和应用提供了丰富的经验。

杜仲在中国分布广泛,其中河南、安徽、江西等地为自然生长,江苏、广西、云南、新疆等地人工种植较为广泛。虽然不同地域不影响其化学成分的种类,但是不同生长环境使部分化学成分和活性成分含量存在很大差异^[8]。目前,有关研究主要侧重于杜仲活性成分的提取及其在功能性食品方面的开发利用;关于杜仲的抗氧化性研究主要涉及不同品种或杜仲产品与其他植物提取物抗氧化能力的差别比较。但针对同一地域杜仲不同部位的营养成分分析及综合抗氧化性研究较少,在大食物观的引领下,严重限制了其在未来食品的开发与应用。不同植物的抗氧化成分的种类及抗氧化机制不同,在同一种植物中采用不同的评价方法得到的结果也不一定相同,为了比较科学地对植物的抗氧化性进行评价,需要采用一种多指标的综合评价方法。

研究拟选取河南漯河产地杜仲,分别对不同部位杜仲的营养价值和抗氧化性进行分析,运用隶属函数法采用多指标的综合评价方法对抗氧化性的各项指标进行综合评价,为今后杜仲产品的特定功能开发提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

杜仲叶、杜仲雄花、杜仲皮:采自河南漯河;
芦丁:HPLC $\geq$ 98%,北京索莱宝科技有限公司;
绿原酸:HPLC $\geq$ 98%,西安汇林生物科技有限公司;
DPPH:纯度 $\geq$ 97%,福州飞净生物科技有限公司;
ABTS⁺:HPLC $\geq$ 98%,合肥博美生物科技有限公司;
硝酸铝、无水乙醇、铁氰化钾、亚硝酸钠、氢氧化钠、三氯乙酸、氯化铁、过硫化钾、葡萄糖、抗坏血酸、苯酚、硫酸:分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

低速离心机:LXJ-IIB 型,上海安亭科学仪器厂;

电热恒温干燥箱:202-0ES 型,北京市永光明医疗仪器厂;

分析天平:FA2004 型,上海上平仪器有限公司;

高速万能粉碎机:FW177 型,北京市永光明医疗仪器厂;

紫外分光光度计:UV-2600 型,上海尤尼柯仪器有限公司;

数显恒温水浴锅:HH-2 型,上海捷呈实验仪器有限公司;

比色皿:751/722 型,无锡新竹光学仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品预处理 将杜仲的叶、雄花和皮于 60℃干燥 12 h,粉碎,过 40 目筛,60℃干燥 6 h,密封备用。

1.3.2 营养成分测定

(1) 灰分:按 GB 5009.4—2016 执行。

(2) 蛋白质:按 GB 5009.5—2016 执行。

(3) 脂肪:按 GB 5009.6—2016 执行。

(4) 维生素 C:参照 GB 5009.86—2016 并修改。准确称取 3 g 试样,均质,加入 20 mL 偏磷酸溶液,超声提取 15 min,过滤,用提取液稀释至 25 mL,备用。

1.3.3 黄酮、绿原酸和多糖标准曲线

(1) 黄酮标准曲线绘制:精密称取 20 mg 芦丁标品于 100 mL 棕色容量瓶中,以蒸馏水定容,得 20 $\mu\text{g/mL}$ 芦丁标准液。准确移取 0.00, 0.50, 1.00, 1.50, 2.00, 2.50, 3.00 mL 芦丁标准液于 10.00 mL 棕色容量瓶中,依次加入 5% 亚硝酸钠溶液 0.3 mL,摇匀,静置 6 min;10% 硝酸铝溶液 0.30 mL,摇匀,静置 6 min;1 mol/L 氢氧化钠溶液 4.00 mL,蒸馏水定容,摇匀,得到质量浓度分别为 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60 $\mu\text{g/mL}$ 的芦丁标准品溶液,静置 15 min。以蒸馏水为空白,测定 510 nm 处吸光值。以芦丁标准品溶液质量浓度为横坐标,吸光值为纵坐标,得到芦丁标线回归方程 $Y=0.010\ 3X+0.009\ 8(R^2=0.999\ 2)$ 。

(2) 绿原酸标准曲线绘制:精密称取 20 mg 绿原酸标准品,以蒸馏水定容,得到 20 $\mu\text{g/mL}$ 的绿原酸标准液。准确移取 0.00, 0.15, 0.30, 0.45, 0.60, 0.75, 0.90 mL 标准液于 10.00 mL 容量瓶中,以蒸馏水定容,摇匀,得到质量浓度分别为 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 $\mu\text{g/mL}$ 的绿原酸标准品溶液,测定 330 nm 处吸光值。以绿原酸标准品溶液质量浓度为横坐标,吸光值为纵坐标,得到绿原酸标线回归方程 $Y=0.065\ 8X+0.014\ 7(R^2=0.999\ 5)$ 。

(3) 多糖标准曲线绘制:精密称取 0.1 g 干燥至恒重的葡萄糖标准品,加水溶解定容,得到 0.1 mg/mL 的葡萄糖标准液。准确移取 0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70 mL 标准液于具塞试管中,加水至 1 mL。加入 5% 苯酚溶液 1 mL,摇匀,迅速滴加 5 mL 硫酸,摇匀,静置

5 min,沸水浴 15 min,冷却至室温;以 1 mL 水为空白对照,测定 490 nm 处吸光度,以葡萄糖标准溶液质量浓度为横坐标,吸光度为纵坐标,得到葡萄糖标线回归方程 $Y=10.254X-0.0065 (R^2=0.9995)$ 。

1.3.4 杜仲样品中黄酮、绿原酸和多糖含量测定

(1) 黄酮含量:准确称取 1.000 g 不同部位杜仲粉末于 100 mL 锥形瓶中,加入 30 mL 蒸馏水,70 °C 水浴 1.5 h,4 000 r/min 离心 20 min,移取上清液作为待测液,测定 510 nm 处吸光度,按式(1)计算黄酮含量。

(2) 绿原酸含量:准确称取 1.000 g 不同部位杜仲粉末于 100 mL 三角瓶中,按照料液比 1:16 (g/mL),60 °C 水浴 3 h,4 000 r/min 离心 20 min,移取上清液作为待测液,测定 330 nm 处吸光度,按式(1)计算绿原酸含量。

$$Y = \frac{C \times V}{m \times 10\,000}, \quad (1)$$

式中:

Y ——杜仲总黄酮/绿原酸含量, g/100 g;

C ——总黄酮/绿原酸质量浓度, $\mu\text{g/mL}$;

V ——测定时体积, mL;

m ——样品质量, g。

(3) 多糖含量:准确称取 1.000 g 各部位杜仲样品粉末于 100 mL 三角瓶中,加入 5 mL 蒸馏水,按料液比 1:5 (g/mL),100 °C 水浴 3 h,4 000 r/min 离心 20 min,移取上清液作为待测液,按一定的稀释倍数进行稀释,取 1 mL 稀释液,加入 5% 苯酚溶液 1 mL,摇匀,迅速加入 5 mL 硫酸,摇匀静置 5 min,沸水浴 15 min,冷却至室温,以 1 mL 蒸馏水作为空白,测定 490 nm 处吸光值,按式(2)计算多糖含量。

$$Y = \frac{C \times V \times D}{m \times 10}, \quad (2)$$

式中:

Y ——杜仲多糖含量, g/100 g;

C ——葡萄糖质量浓度, mg/mL;

V ——测定时体积, mL;

D ——葡萄糖转换成多糖的换算因子;

m ——样品质量, g。

1.3.5 抗氧化活性测定

(1) 总还原力:分别取不同质量浓度(5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 $\mu\text{g/mL}$)的杜仲提取物于 10 mL 容量瓶中,依次加入 pH 为 6.6、浓度为 0.2 mol/L 的磷酸缓冲液 2.5 mL 和 1% 的铁氰化钾 2.5 mL,50 °C 水浴 20 min;迅速冷却,加入 10% 三氯乙酸 2.5 mL,3 000 r/min 离心 10 min,移取上清液 2.5 mL,加入蒸馏水 2.5 mL 和 0.1% 三氯化铁 0.5 mL,混匀,静置 10 min,测定 700 nm 处吸光值。为去除样品的影响,取 10 mL 蒸馏水代替样品重复测定步骤;为去除反

应试剂(如铁氰化钾、三氯乙酸、三氯化铁)的影响,取 10 mL 样品和 2.5 mL 缓冲液,其余以蒸馏水替代重复测定步骤。取维生素 C 配制相同质量浓度溶液,测定吸光度。按式(3)计算总还原力。

$$A = A_i - A_j, \quad (3)$$

式中:

A ——杜仲总还原力;

A_i ——样品组吸光值;

A_j ——对照组吸光值。

(2) DPPH 自由基清除能力:取不同质量浓度(5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 $\mu\text{g/mL}$)的维生素 C 溶液 1 mL,加入 4.0 mL 浓度为 0.06 mmol/L 的 DPPH 溶液,以 1 mL 水与 4 mL 无水乙醇调零,混匀,黑暗环境中静置 30 min,测定 517 nm 处吸光值。以 1 mL 蒸馏水加入 4 mL 的 DPPH 溶液为空白组,测定吸光值;以 1 mL 不同质量浓度梯度的维生素 C 溶液加入 4 mL 无水乙醇为对照组,测定吸光值。吸取与维生素 C 等质量浓度梯度的样品溶液各 1.0 mL 于 10 mL 容量瓶中,加入 4.0 mL 浓度为 0.06 mmol/L 的 DPPH 溶液,以 1 mL 水和 4 mL 无水乙醇调零,摇匀,静置 30 min,测定 517 nm 处吸光值。以 1 mL 蒸馏水和 4 mL DPPH 溶液为空白组,测定吸光值,以 1 mL 不同质量浓度样液和 4 mL 无水乙醇为对照组,按式(4)计算 DPPH 自由基清除率。

$$R = \left(1 - \frac{A_i - A_j}{A_0}\right) \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

R ——DPPH 自由基清除率, %;

A_i ——样品组吸光值;

A_j ——对照组吸光值;

A_0 ——空白组吸光值。

(3) ABTS⁺自由基清除能力:取不同质量浓度(5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 $\mu\text{g/mL}$)维生素 C 溶液各 0.1 mL 于 10 mL 容量瓶中,加入 3.0 mL ABTS⁺工作液,静置反应 5 min,以 0.1 mL 蒸馏水和 3 mL 无水乙醇调零,测定 734 nm 处吸光值,取 0.1 mL 蒸馏水代替维生素 C 溶液重复测定步骤。吸取与维生素 C 等质量浓度梯度的样液各 0.1 mL 于 10 mL 容量瓶中,加入 ABTS⁺工作液 3.0 mL,静置反应 5 min,以 0.1 mL 蒸馏水和 3 mL 无水乙醇调零,测定 734 nm 处吸光值,取 0.1 mL 蒸馏水代替样品溶液重复测定步骤,按式(5)计算 ABTS⁺自由基清除率。

$$R = \left(1 - \frac{A_i}{A_0}\right) \times 100\%, \quad (5)$$

式中:

R ——ABTS⁺自由基清除率, %;

A_0 ——空白组吸光度;

A_1 ——样品组吸光度。

1.4 数据处理

各指标均重复测定 3 次,采用 Excel 2016 软件进行数据整理。比较分析和作图采用 R 语言(v4.3.1),利用 R 语言进行平均值和标准差等描述性指标的统计,结果以平均值±标准差表示。采用多元统计方法分析杜仲不同部位活性成分与抗氧化活性的关联性。对活性成分含量及抗氧化指标进行 Z-score 标准化处理,计算各变量之间的皮尔逊相关系数,显著性水平为 $P<0.05$ 。以隶属函数均值为因变量,总黄酮、绿原酸、多糖为自变量,建立多元线性回归模型,评估各活性成分对综合抗氧化能力的贡献度。

2 结果与分析

2.1 杜仲不同部位的基本营养成分分析

由表 1 可知,杜仲不同部位之间 4 种基本营养物质含量均存在显著性差异($P<0.05$)。在脂肪含量方面,杜仲叶的最高,为 6.19 g/100 g,杜仲花的最低,具体表现为叶>皮>雄花。灰分是指植物体中矿质元素含量的总和,其高低可反映不同植物对矿质元素选择吸收与积累的特点^[9]。杜仲叶中灰分含量最多,可达 13.65 g/100 g,杜仲雄花和树皮中灰分含量虽然接近,但具有统计学差异,具体表现为叶>皮>雄花。在蛋白质含量方面,雄花中的最多,高达 20.8 g/100 g,远高于叶和皮中的,具体表现为雄花>叶>皮。在维生素 C 含量方面,雄花中的最高,为 13.9 g/100 g,显著高于叶和皮中的,具体表现为雄花>叶>皮。

表 1 杜仲不同部位营养成分差异性比较[†]

Table 1 Comparison of nutritional components in different parts of *Eucommia ulmoides* g/100 g

部位	脂肪	灰分	蛋白质	维生素 C
叶	6.19±0.05 ^a	13.64±0.04 ^a	11.90±0.03 ^b	5.16±0.06 ^b
雄花	3.25±0.03 ^c	6.77±0.03 ^c	20.77±0.04 ^a	13.96±0.08 ^a
皮	5.59±0.03 ^b	7.53±0.06 ^b	4.63±0.05 ^c	3.12±0.06 ^c

[†] 小写字母不同代表差异显著($P<0.05$)。

综合以上 4 个营养素成分指标来看,不同部位杜仲极具开发潜力。杜仲叶富含蛋白质、脂肪和矿物质,其叶中蛋白质具有良好的氨基酸组成,其蛋白含量高于玉米、谷、高粱和薯类,与大麦、小麦等的相当^[10]。而脂类物质含量对茶叶的香气形成以及脂溶性维生素的吸收有着积极作用^[11]。徐文浹等^[12]研究表明,杜仲雄花具有蛋白质含量高、脂肪含量低的特点,与试验结果一致。雄花中维生素 C 的含量显著高于其他部位,维生素 C 作为人体中一种重要的维生素,在提高免疫力、预防病菌、疾病发生方

面有很大的作用,其还可以直接杀死肿瘤细胞。因此,可将杜仲雄花作为维生素 C 的天然来源进行加工处理。

2.2 杜仲不同部位的活性成分分析

由表 2 可知,不同部位杜仲的活性成分含量存在显著性差异($P<0.05$)。其中,杜仲叶中黄酮含量最高,其次为雄花,皮中最少。Fan 等^[13]研究显示,不同部位杜仲中黄酮含量由高到低为雄花>叶>皮,与试验结果略有不符,可能是试验选用的杜仲叶较老,且杜仲叶中的黄酮含量在不同的生长期差异较大,其含量在老叶中偏高。杜仲叶中的绿原酸含量最高,雄花的与其接近,皮中的最少。杜仲中的多糖含量在 3 种活性成分中占比较低,其叶中含量仅为 1.2 g/100 g,为 3 个部位中含量最高的,雄花中的多糖含量与叶中的接近,但差异显著,皮中的多糖含量最低。

表 2 杜仲不同部位活性成分差异性比较[†]

Table 2 Comparison of active components in different parts of *Eucommia ulmoides* g/100 g

部位	黄酮	绿原酸	多糖
叶	2.45±0.20 ^a	1.61±0.03 ^a	1.27±0.03 ^a
雄花	1.85±0.04 ^b	1.46±0.02 ^b	1.17±0.03 ^b
皮	0.42±0.02 ^c	0.41±0.04 ^c	0.51±0.03 ^c

[†] 小写字母不同代表差异显著($P<0.05$)。

综上,杜仲叶中活性物质十分丰富,其黄酮、绿原酸及多糖含量均较高,目前在杜仲中发现的黄酮类化合物有 10 多种,主要有槲皮素、芦丁、山奈酚、槲皮苷、金丝桃苷等^[14-15]。杜仲中的黄酮能够提高超氧化物歧化酶活性,具有良好的抗氧化性,且对于治疗高血压和动脉粥样硬化等心血管疾病有显著作用,因此杜仲黄酮是一种极具开发和研究价值的活性物质^[16]。绿原酸是一种酚酸,常作为判断杜仲质量的一个评价指标^[17]。绿原酸具有良好的抗氧化、抗肿瘤和杀菌等生理功能。因此在以黄酮和绿原酸为主的提取和应用过程中,建议以杜仲叶或雄花为原料进行研究。多糖是近年来从杜仲叶中新发现的活性成分,含量丰富^[18],但其成分较复杂。杜仲多糖具有很好的抗疲劳、增强机体免疫力效果。陈蕾^[19]、龚频等^[6]通过不同方法分别提取杜仲叶和皮中的多糖,发现杜仲叶和皮中多糖特性几乎没有差异,且不受提取方法影响。

2.3 杜仲不同部位的体外抗氧化活性分析

2.3.1 总还原力 由图 1 可知,不同部位杜仲提取液的总还原力随着提取液质量浓度的升高而增加,呈现一定的线性关系,且 R^2 均 >0.9 ,表明方程拟合度很高。在 0~35 μg/mL 质量浓度范围内,维生素 C 的吸光值迅速上升,而杜仲叶、雄花和树皮的吸光值缓慢上升,其总还原力仍远低于维生素 C 的。

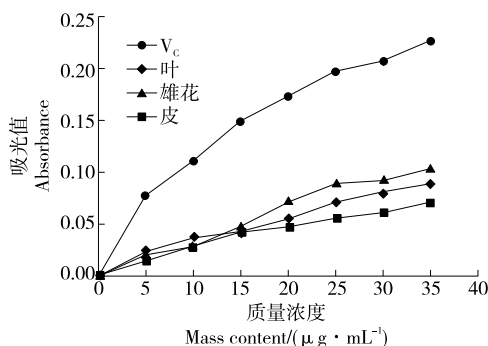


图1 杜仲不同部位提取液的还原能力

Figure 1 Reduction abilities of extracts from different parts of *Eucommia ulmoides*表3 不同部位杜仲提取液的还原能力及IC₅₀值Table 3 IC₅₀ and reduction abilities of extracts from different parts of *Eucommia ulmoides*

还原力	回归方程	R ²	IC ₅₀ 值/ (μg·mL ⁻¹)
维生素C	$Y=0.006x+0.0378$	0.9268	7.38
雄花	$Y=0.0031x+0.003$	0.9759	10.20
皮	$Y=0.002x+0.0062$	0.9706	15.63
叶	$Y=0.0024x+0.0074$	0.9793	12.89

2.3.2 DPPH自由基清除能力 由图2可知,不同部位杜仲提取液和维生素C均表现出良好的DPPH自由基清除效果,在一定的质量浓度范围内,不同部位杜仲提取物对DPPH自由基清除率随着质量浓度的升高而增大。由表4可知,维生素C,不同部位杜仲提取液对DPPH自由基的清除效果为叶>雄花>皮,但弱于维生素C的。

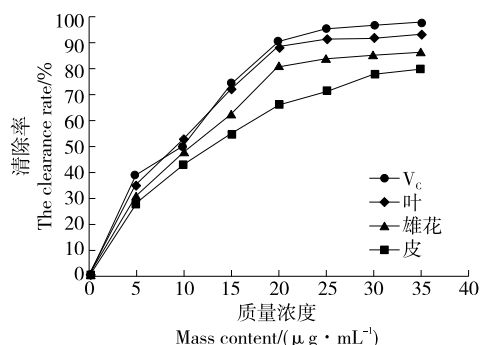


图2 杜仲不同部位提取液对DPPH自由基的清除效果

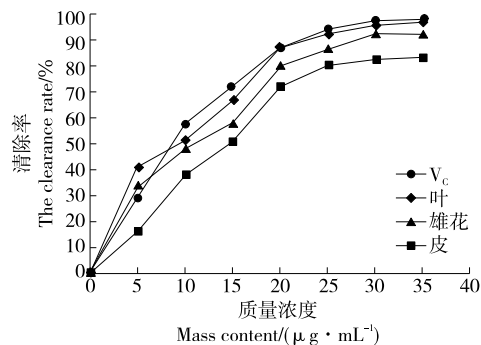
Figure 2 DPPH free radical scavenging effects of extracts from different parts of *Eucommia ulmoides*

2.3.3 ABTS⁺自由基清除能力 由图3可知,在一定的质量浓度范围内,不同部位杜仲提取物对ABTS⁺自由基的清除率随着质量浓度的升高而增大,具有明显的量效关

表4 不同部位杜仲提取液对DPPH自由基清除率的IC₅₀值Table 4 IC₅₀ of extracts from different parts of *Eucommia ulmoides* in scavenging DPPH free radicals

样品	回归方程	R ²	IC ₅₀ 值/ (μg·mL ⁻¹)
雄花	$Y=0.0238x+0.1806$	0.8604	13.42
皮	$Y=0.0215x+0.1516$	0.9020	16.21
叶	$Y=0.0255x+0.2105$	0.9016	11.40
维生素C	$Y=0.0268x+0.2108$	0.8582	10.70

系。由表5可知,杜仲雄花、皮、叶及维生素C对ABTS⁺自由基的清除能力大小为维生素C>叶>雄花>皮。

图3 杜仲不同部位提取液对ABTS⁺自由基的清除效果Figure 3 ABTS⁺ free radical scavenging effects of extracts from different parts of *Eucommia ulmoides*表5 杜仲不同部位提取液ABTS⁺自由基清除率的IC₅₀值Table 5 IC₅₀ of extracts from different parts of *Eucommia ulmoides* in scavenging ABTS⁺ free radicals

样品	回归方程	R ²	IC ₅₀ 值/ (μg·mL ⁻¹)
雄花	$Y=0.0257x+0.1657$	0.9052	13.01
皮	$Y=0.0253x+0.0869$	0.9229	16.33
叶	$Y=0.0262x+0.2068$	0.8751	11.19
维生素C	$Y=0.0274x+0.2311$	0.8733	9.81

2.4 杜仲不同部位的体外抗氧化活性综合评价

参照马艳芝等^[20-21]的方法,运用隶属函数法对不同部位杜仲提取液的抗氧化性进行综合评价。由表6可知,杜仲叶的抗氧化效果最好,其隶属函数值为0.932,皮的抗氧化效果最弱,隶属函数值为0.680。

邓云云^[22]研究表明,不同部位杜仲均有一定的抗氧化能力,且对DPPH自由基和ABTS⁺自由基的清除能力均为叶>愈伤组织>皮。钟淑娟等^[3]研究发现,不同部位杜仲对ATBS⁺自由基、DPPH自由基清除作用由强到弱为叶>雄花>籽>皮,对Cu²⁺还原能力由强到弱为叶>雄

表 6 杜仲不同部位提取液的抗氧化活性综合评价

Table 6 Comprehensive evaluation of antioxidant activities of extracts from different parts of *Eucommia ulmoides*

样品	隶属函数值		总还原力	隶属函数均值	综合排名
	DPPH 自由基清除率	ABTS ⁺ 自由基清除率			
雄花	0.849	0.868	1.000	0.906	2
皮	0.703	0.685	0.652	0.680	3
叶	1.000	1.000	0.796	0.932	1

花>皮>籽,但不同部位杜仲中黄酮含量与抗氧化能力并非呈正相关趋势。朱丽蓉等^[23]研究发现,在试验质量浓度范围内,杜仲雄花茶多糖的抗氧化能力随着质量浓度的升高而增强,呈现出量效关系。综上,不同的研究对象、不同的测定方法、不同的评价体系,最终得到的抗氧化活性结果不一定完全一致。

为综合评价杜仲不同部位的抗氧化能力,利用隶属函数值评价法,结果显示杜仲叶的抗氧化效果最强,皮的最弱,但在总还原力试验中,杜仲花的总还原力最强。邓云云等^[24]研究发现,杜仲的总黄酮含量和总酚含量与 DPPH 自由基清除能力、ABTS⁺自由基清除能力具有显著相关性,该试验也得出杜仲叶的 DPPH 自由基清除能力和 ABTS⁺自由基清除能力最大。一些多酚类化合物,其结构中的多个酚羟基既可能参与还原反应表现出总还原力,又可能通过与自由基结合发挥自由基清除作用,但由于羟基的位置、活性等因素在两种能力上的表现可能不均衡。曾令琴等^[25]指出,不同的黄酮类物质的抗氧化能力大小与其结构密切相关,特别是与羟基的位置关系密切,因此不同成分的作用靶点差异也是导致杜仲叶总还原力弱的原因之一。

2.5 活性成分与抗氧化活性的多元统计分析

2.5.1 皮尔逊相关系数矩阵 由表 7 可知,总黄酮与 DPPH 自由基的 IC₅₀ 值呈极显著负相关($r=-0.942, P=0.003$),表明总黄酮是 DPPH 自由基清除能力的主要贡献者;绿原酸与 ABTS⁺自由基的 IC₅₀ 值呈显著负相关($r=-0.876, P=0.012$),提示其通过单电子转移机制中和 ABTS⁺自由基;多糖含量与总还原力呈正相关($r=0.724, P=0.068$),杜仲多糖的抗氧化活性与相对分子质量、单糖组成(如葡萄糖醛酸)及糖苷键类型密切相关。其羟基和糖醛酸等官能团可通过提供电子或氢原子清除自由基,进而提升总还原力^[26]。魏晶晶^[27]以果蝇和小鼠为模型,发现杜仲多糖可通过调节肠道菌群激活 Nrf2 抗氧化通路,上调 SOD 等抗氧化酶表达,间接增强了杜仲的总还原力。杨玉林^[28]研究发现,总还原力随着杜仲多糖质量浓

度的升高呈上升趋势,但未达到统计学显著性,推测多糖的结构特征可能影响了还原能力的测定结果,另外不同提取方法可能影响多糖的活性成分,从而干扰总还原力的统计学显著性。此外,隶属函数均值与总黄酮($r=0.913, P=0.001$)、绿原酸($r=0.828, P=0.008$)均呈显著正相关,说明二者是综合抗氧化能力的核心驱动因子。

表 7 活性成分与抗氧化指标的相关系数矩阵[†]

Table 7 Correlation coefficient matrix of active ingredients and antioxidant indicators

指标	总黄酮	绿原酸	多糖
DPPH 自由基 IC ₅₀ 值	-0.942**	-0.621	-0.238
ABTS ⁺ 自由基 IC ₅₀ 值	-0.713	-0.876*	-0.305
总还原力	0.512	0.488	0.724
隶属函数均值	0.913**	0.828*	0.405

† * $P<0.05$, ** $P<0.01$ 。

2.5.2 多元线性回归分析 由表 8 可知,总黄酮($\beta=0.647, P=0.002$)和绿原酸($\beta=0.358, P=0.021$)对隶属函数均值贡献显著,可解释 92.7% 的抗氧化能力变异(调整 $R^2=0.927, F=32.15, P<0.001$),而多糖的贡献未达显著水平($\beta=0.095, P=0.412$)。总黄酮和绿原酸是杜仲综合抗氧化能力的决定性成分,为开发高黄酮/绿原酸的杜仲叶功能性食品提供了理论依据。

表 8 多元线性回归分析结果[†]

Table 8 Results of multivariate linear regression analysis

自变量	回归系数(β)	标准误	t 值	P 值
总黄酮	0.647	0.071	9.113	0.002**
绿原酸	0.358	0.058	6.172	0.021*
多糖	0.095	0.082	1.158	0.412
截距项	0.203	0.105	1.933	0.185

† * $P<0.05$, ** $P<0.01$ 。

3 结论

从综合营养成分指标来看,杜仲不同部位极具开发潜力。杜仲叶富含蛋白质、脂肪和矿物质,其蛋白含量高于玉米、谷、高粱、薯、大麦、小麦等,因此杜仲叶作为药食同源物质在以蛋白质为原料的开发利用上有一定的价值。此外,雄花中维生素 C 含量显著高于其他部位,维生素 C 作为人体中一种重要的维生素,建议可以将杜仲雄花作为维生素 C 的天然来源进行加工处理。从活性成分的含量来看,杜仲叶中的黄酮、绿原酸和多糖含量最高,其次为雄花和杜仲皮。通过对杜仲不同部位的体外抗氧化活性研究,发现杜仲叶的综合抗氧化效果最强,皮的最

弱。后续可有针对性地开发具有不同功能的食品,如抗氧化饮料、降血压代茶饮、增强免疫的保健食品及天然甜味剂。

参考文献

- [1] XING Y F, HE D, WANG Y, et al. Chemical constituents, biological functions and pharmacological effects for comprehensive utilization of *Eucommia ulmoides* Oliver[J]. Food Science and Human Wellness, 2019, 8(2): 177-188.
- [2] 曾桥, 韦承伯, 吕生华. 杜仲叶主要活性成分研究进展[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(34): 133-135.
ZENG Q, WEI C B, LV S H. Research progress on main active components of eucommia ulmoides leaves[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, 45(34): 133-135.
- [3] 钟淑娟, 杨欣, 李静, 等. 杜仲不同部位总黄酮含量及抗氧化活性研究[J]. 中国药房, 2017, 28(13): 1 787-1 790.
ZHONG S J, YANG X, LI J, et al. Study on the total flavonoids content and antioxidant activity in different parts of *Eucommia ulmoides*[J]. China Pharmacy, 2017, 28(13): 1 787-1 790.
- [4] 刘聪, 郭非非, 肖军平, 等. 杜仲不同部位化学成分及药理作用研究进展[J]. 中国中药杂志, 2020, 45(3): 497-512.
LIU C, GUO F F, XIAO J P, et al. Research advances in chemical constituents and pharmacological activities of different parts of *Eucommia ulmoides*[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2020, 45(3): 497-512.
- [5] 胡杨, 李先芝, 刘洋, 等. 杜仲化学成分、药理作用及应用研究进展[J]. 亚太传统医药, 2022, 18(2): 234-239.
HU Y, LI X Z, LIU Y, et al. Research progress on chemical constituents, pharmacological effects and application of *Eucommia ulmoides*[J]. Asia-Pacific Traditional Medicine, 2022, 18(2): 234-239.
- [6] 龚频, 韩业雯, 翟鹏涛, 等. 杜仲叶的活性成分、药理作用及其在食品加工中的应用[J]. 食品工业科技, 2022, 43(10): 395-404.
GONG P, HAN Y W, ZHAI P T, et al. Active components, pharmacological action and application in food processing of *Eucommia ulmoides* leaves[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(10): 395-404.
- [7] 王晓宇, 杜国荣, 李华. 抗氧化能力的体外测定方法研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2012, 31(3): 247-252.
WANG X Y, DU G H, LI H. Progress of analytical methods for antioxidant capacity in vitro[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2012, 31(3): 247-252.
- [8] 王丽艳, 王鑫淼, 荆瑞勇, 等. 不同品种亚麻籽营养成分分析与品质综合评价[J]. 食品与机械, 2021, 37(7): 26-32.
WANG Y L, WANG X M, JING R Y, et al. Comprehensive quality evaluation and analysis of nutrition components of various flaxseed[J]. Food & Machinery, 2021, 37(7): 26-32.
- [9] 金则新, 李钧敏, 马金娥, 夏蜡梅及其主要伴生种叶的灰分含量和热值[J]. 生态学报, 2011, 31(18): 5 246-5 254.
- [10] JIN Z X, LI J M, MA J E. Ash content and caloric value in the leaves of *Sinocalycanthus chinensis* and its accompanying species[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(18): 5 246-5 254.
- [10] 张军民, 高振川, 张琪, 等. 杜仲叶及提取物营养价值 and 药用成分研究[J]. 氨基酸和生物资源, 2002, 24(1): 1-3.
ZHANG J M, GAO Z C, ZHANG Q, et al. Study on nutritional and medical components of *Eucommia ulmoides* leaves and their extracts[J]. Amino Acids & Biotic Resources, 2002, 24(1): 1-3.
- [11] 袁乐学. 茶叶在烹饪中的应用研究[J]. 福建茶叶, 2023, 45(1): 140-142.
YUAN L X. Research on the application of tea in cooking[J]. Tea in Fujian, 2023, 45(1): 140-142.
- [12] 徐文泐, 唐小兰, 宋阳, 等. 基于响应面法优化杜仲雄花茶中活性成分及加工工艺[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(7): 2 561-2 568.
XU W Y, TANG X L, SONG Y, et al. Optimization of the active ingredients and processing technology of *Eucommia ulmoides* male flower tea based on response surface methodology[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(7): 2 561-2 568.
- [13] FAN S S, YIN Q S, LI D N, et al. Anti-neuroinflammatory effects of *Eucommia ulmoides* Oliv. in a Parkinson's mouse model through the regulation of p38/JNK-Fos12 gene expression[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2020, 260: 113016.
- [14] TOHIDI B, RAHIMMALEK M, ARZANI A. Essential oil composition, total phenolic, flavonoid contents, and antioxidant activity of *Thymus* species collected from different regions of Iran[J]. Food Chemistry, 2017, 220: 153-161.
- [15] 闫建昆, 张翔宇, 石旭柳, 等. 杜仲叶中黄酮类化学成分研究[J]. 中国现代中药, 2021, 23(4): 599-604.
YAN J K, ZHANG X Y, SHI X L, et al. Study on flavonoids from leaves of *Eucommia ulmoides*[J]. Modern Chinese Medicine, 2021, 23(4): 599-604.
- [16] QI S S, ZHENG H X, CHEN C, et al. Du-Zhong(*Eucommia ulmoides* oliv.) cortex extract alleviates lead acetate-induced bone loss in rats[J]. Biol Trace Elem Res, 2019, 187(1): 172-180.
- [17] 兰济艳, 刘泽, 张芹, 等. 不同产地杜仲生长特性及叶中主要有效成分含量的差异与动态变化[J]. 河北农业大学学报, 2019, 42(1): 51-56.
LAN J Y, LIU Z, ZHANG Q, et al. A study on growth characteristics of *Eucommia ulmoides* Oliver in different areas and the dynamic changes of main effective components in leaves[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2019, 42(1): 51-56.
- [18] 董娟娥, 梁宗锁, 靳爱仙, 等. 杜仲叶酸性多糖提取分离及含量测定[J]. 林业科学, 2006, 42(10): 59-64.

- DONG J E, LIANG Z S, JIN A X, et al. The extraction and content measurement of acidic polysaccharides from *eucommia ulmoides* leaves[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2006, 42(10): 59-64.
- [19] 陈蕾. 杜仲叶中多糖分子物的提取及其对运动人体免疫功能的影响[J]. *基因组学与应用生物学*, 2019, 38(11): 5 238-5 243.
- CHEN L. Study on the extraction of polysaccharide molecules from *Eucommia ulmoides* leaves and its effect on human immune function in sports[J]. *Genomics and Applied Biology*, 2019, 38(11): 5 238-5 243.
- [20] 马艳芝. 不同柴胡品种抗氧化活性的比较与评价[J]. *时珍国医国药*, 2017, 28(4): 968-970.
- MA Y Z. Comparison and evaluation of antioxidant activities of different *Bupleurum* species[J]. *Lishizhen Medicine and Materia Medica Research*, 2017, 28(4): 968-970.
- [21] 孙强, 郭永霞. 12 个品种小米氨基酸含量测定及品质综合评价[J]. *食品与机械*, 2022, 38(8): 34-39.
- SUN Q, GUO Y X. Quality comprehensive assessment and measurement aminoacid content of 12 varieties of millet[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(8): 34-39.
- [22] 邓云云, 张俊娥. 杜仲愈伤组织及其叶和皮的抗氧化活性及降血糖能力比较[J]. *分子植物育种*, 2019, 17(3): 1 006-1 010.
- DENG Y Y, ZHANG J E. Comparative study on antioxidant activity and hypoglycemic ability of callus, leaves and bark of *Eucommia ulmoides*[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2019, 17(3): 1 006-1 010.
- [23] 朱丽蓉, 吴萍萍, 杨大伟, 等. 杜仲雄花茶多糖的响应面优化提取及其抗氧化活性评价[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(3): 199-203, 213.
- ZHU L R, WU P P, YANG D W, et al. Study on the optimization of extracting polysaccharides from *Eucommia* male flowers tea by response surface methodology and the antioxidant evaluation[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(3): 199-203, 213.
- [24] 邓云云, 张俊娥. 杜仲叶活性成分提取方法对其抗氧化性和降血糖能力的影响[J]. *分子植物育种*, 2018, 16(19): 6 504-6 508.
- DENG Y Y, ZHANG J E. Effect of the extraction method of active components in *Eucommia ulmoides* leaves on its antioxidant activity and hypoglycemic ability[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2018, 16(19): 6 504-6 508.
- [25] 曾令琴, 郭江涛, 刘杰, 等. 芦荟炒制品中总黄酮提取工艺优化及抗氧化活性研究[J]. *食品与机械*, 2023, 39(10): 175-183.
- ZENG L Q, GUO J T, LIU J, et al. Optimization of extraction process and antioxidant activity of total flavonoids from *Aloe vera* stir-fry products[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(10): 175-183.
- [26] 王瑞, 王景媛, 郭敏, 等. 杜仲多糖的提取分离纯化、结构特征及其药理活性研究进展[J]. *中草药*, 2024, 55(4): 1 075-1 088.
- WANG R, WANG J Y, GUO M, et al. Research progress on extraction, isolation, purification, structural features, and pharmacological activity of *Eucommia ulmoides* polysaccharides[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2024, 55(4): 1 075-1 088.
- [27] 魏晶晶. 杜仲多糖抗衰老的作用及机制研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2023: 32-40.
- WEI J J. Study on the anti-aging effect and mechanism of *Eucommia ulmoides* polysaccharides[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2023: 32-40.
- [28] 杨玉林. 杜仲多糖提取及抗氧化性能研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2023: 27-31.
- YANG Y L. Study on extraction and antioxidant properties of polysaccharides from *Eucommia ulmoides* oliver[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2023: 27-31.