伊木然江·苏布哈提, 成昱廷, 王苗苗, 等. 不同皮色芜菁块根功能成分含量及抗炎、抗氧化作用 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(6): 359−368. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020169
YIMURANJIANG·Subuhati , CHENG Yuting, WANG Miaomiao, et al. Functional Component Contents, Anti-inflammatory and Antioxidant Activities of Turnip Roots with Different Peel Colors[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(6): 359−368. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020169

·营养与保健·

# 不同皮色芜菁块根功能成分含量及抗炎、抗氧化作用

伊木然江·苏布哈提[1], 成昱廷[2], 王苗苗[1], 杨佳欣[1], 田　合[1], 李慕春[1,*], 郭金喜[3,*]
（1.新疆维吾尔自治区科技资源共享服务中心, 新疆特色功能食品营养与安全检测重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830011;
2.扬子江药业集团江苏海慈生物药业有限公司, 江苏泰州 225300;
3.新疆维吾尔自治区质量基础发展研究院, 新疆乌鲁木齐 830011）

**摘　要:** 为评价不同皮色芜菁块根功能成分含量及抗炎、抗氧化作用差异，利用比色法测定白皮、紫皮、黄皮芜菁提取物中多糖、黄酮、皂苷、硫代葡萄糖苷和多酚含量，并通过 LPS 诱导建立 RAW264.7 细胞炎症模型，测定不同皮色芜菁提取物对脂多糖（Lipopolysaccharide，LPS）刺激的 RAW264.7 细胞活性和炎症因子的含量，同时初步评价三种皮色芜菁体外抗氧化作用。结果表明，紫皮、白皮、黄皮芜菁的多糖含量分别为 28.35、9.97、7.43 g/100 g；黄酮含量分别为 0.159、0.156、0.201 g/100 g，皂苷含量分别为 3.67、3.40、4.50 g/100 g，硫代葡萄糖苷含量分别为 1.14、2.13、1.54 g/100 g，多酚含量分别为 500.7、318.05、313.3 g/100 g；紫皮、白皮、黄皮芜菁提取物均能提升细胞活力（$P$<0.05），并有效抑制 LPS 诱导产生的 NO、IL-6、TNF-$\alpha$ 和 IL-1$\beta$ 等炎症因子的水平。白皮、紫皮、黄皮芜菁提取物对 DPPH·清除率分别为 47.26%、38.10%、63.42%，对 $ABTS^{+}$·清除率分别为 81.18%、87.30%、99.73%。本研究为深入探讨芜菁的抗炎机制及其功能成分的构效关系提供了重要的实验依据，同时也为芜菁资源的多元化开发利用提供了科学参考。

**关键词:** 芜菁, 多糖, 黄酮, 抗炎, 抗氧化
**中图分类号:** TS201.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)06−0359−10
**DOI:** 10.13386/j.issn1002-0306.2025020169
本文网刊:

# Functional Component Contents, Anti-inflammatory and Antioxidant Activities of Turnip Roots with Different Peel Colors

**YIMURANJIANG·Subuhati [1], CHENG Yuting[2], WANG Miaomiao[1], YANG Jiaxin[1], TIAN He[1], LI Muchun[1,*], GUO Jinxi[3,*]**
（1.Xinjiang Uygur Autonomous Region Science and Technology Resources Sharing Service Centre (SRS), Xinjiang Key Laboratory of Nutrition and Safety Testing for Characteristic Functional Foods, Urumqi 830011, China;
2.Yangtze River Pharmaceutical Group Jiangsu HAI-CI Biological Pharmaceutical Co., Ltd., Taizhou 225300, China;
3.Xinjiang Uyghur Autonomous Region Quality Infrastructure Development Research Institute, Urumqi 830011, China）

**Abstract:** To evaluate the differences in functional component contents as well as anti-inflammatory and antioxidant effects among turnip roots with different peel colors, colorimetric methods were employed to determine the contents of polysaccharides, flavonoids, saponins, glucosinolates, and polyphenols in extracts from white-, purple-, and yellow-peeled

**收稿日期:** 2025−02−24
**基金项目:** 新疆维吾尔自治区公益性科研院所基本科研业务经资助项目（KY2024157）; 新疆维吾尔自治区重点研发专项计划项目（2022B02037-3）; 青年拔尖人才项目—青年科技创新人才项目（2023TSYCCX0074）。
**作者简介:** 伊木然江·苏布哈提（1995−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 天然产物提取分离与活性评价, E-mail: 1213195499@qq.com。
*** 通信作者:** 李慕春（1978−）, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 天然产物化学及功能食品研究, E-mail: 164228718@qq.com。
郭金喜（1981−）, 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 食品检测及监管, E-mail: 21798277@qq.com。

turnips. An LPS-induced inflammatory model was established using RAW264.7 cells to assess the effects of turnip extracts with different peel colors on the viability of RAW264.7 cells stimulated by lipopolysaccharide (LPS) and on the levels of inflammatory mediators (NO, IL-6, TNF-$\alpha$, IL-1$\beta$). Meanwhile, the *in vitro* antioxidant activities (DPPH· and $ABTS^{+}$· radical scavenging assays) of the three types of turnip peel extracts were preliminarily evaluated. Results showed that polysaccharide contents were 28.35, 9.97, and 7.43 g/100 g in purple-, white-, and yellow-peeled turnips, respectively. Corresponding values of 0.159, 0.156, and 0.201 g/100 g were obtained for flavonoid levels; 3.67, 3.40, and 4.50 g/100 g for saponin contents; 1.14, 2.13, and 1.54 g/100 g for glucosinolate concentrations; and 500.7, 318.05, and 313.3 g/100 g for polyphenol levels. The extracts of purple, white, and yellow-peeled turnips contributed to a significant enhancement of cell viability ($P$<0.05) and effectively suppressed the levels of inflammatory factors induced by LPS, including NO, IL-6, TNF-$\alpha$, and IL-1$\beta$. The DPPH· scavenging rates of extracts were 47.26%, 38.10%, and 63.42%, respectively, whereas those of $ABTS^{+}$· reached 81.18%, 87.30%, and 99.73%, respectively. This study provides critical experimental evidence for elucidating the anti-inflammatory mechanisms of turnips and the structure-activity relationships of their bioactive components, while also offering scientific references for the diversified development and utilization of turnip resources.

**Key words**: *Brassica rapa* L.; polysaccharides; flavonoids; anti-inflammatory; antioxidant

芜菁(*Brassica rapa* L.)是十字花科芸苔属两年生草本,广泛分布于中国新疆、西藏、青海等高海拔地区[1−3]。在新疆芜菁被叫作恰玛古,主产于新疆的天山西南及塔里木盆地西北地区[4]。作为一种生长在特定环境中的植物,它适应了当地独特的地理和气候条件,展现出顽强的生命力,其貌不扬的外表下却蕴含着丰富的营养价值[5]。

芜菁按照根部皮色可以分为白皮、紫皮和黄皮[6],如图 1 所示,其外观通常呈球形或扁圆形,表皮颜色呈白色、紫色或黄色。芜菁可以熟食或通过泡酸菜来食用,也可以被加工成各种美食为餐桌增添独特的风味[7]。芜菁根部富含多糖、硫代葡萄糖苷、多酚、黄酮及有机酸类等功能成分[8],具有舒胸顺气、健胃消食、解毒、抑菌等丰富的药用价值,被当地居民用来治疗气管炎、食欲不振、体虚多梦、腹泻和疮疖肿毒等疾病和症状,因此,芜菁被当地人誉为“新疆小人参”[9−10]。



图 1 不同皮色新疆芜菁块根图片

Fig.1 Images of Xinjiang turnip roots with different skin colors

注:从左至右分别是白皮、紫皮、黄皮芜菁块根。

芜菁的现代药理学研究表明,芜菁具有抗癌[11−12]、抗菌[13]、免疫刺激[14],肾脏保护[15],保护肺损伤[16],预防缺氧脑肺水肿[17−18]和预防骨质疏松症[4]等作用。此外,流行病学研究显示,食用芸苔属蔬菜与患慢性病的风险呈负相关,尤其是心血管疾病、癌症、阿尔茨海默病、白内障和与年龄有关的功能衰退[19−20]。

尽管对芜菁的化学成分或生物活性相关已有较多的研究,但以上报道大部分以某一品种的芜菁作为受试对象进行实验研究,尚无文献报道有关不同皮色芜菁块根功能成分含量以及抗炎抗氧化作用相关的研究。岳丽等[21]通过顶空气相-离子迁移色谱对三种皮色芜菁根进行挥发性成分的分析,发现不同颜色芜菁的特征挥发性化合物组成和含量存在明显差异,紫色芜菁中挥发性化合物种类最少,白色芜菁中最多,提示三种皮色芜菁其他功能性成分及活性可能也存在显著差异。

因此,本研究以新疆不同皮色芜菁块根作为研究对象,考察不同皮色芜菁根中多糖、硫代葡萄糖苷、黄酮、皂苷和多酚等功能成分的含量差异,利用脂多糖(LPS)建立 RAW264.7 细胞验证模型,检测白细胞介素-6(Interleukin-6, IL-6)、白细胞介素-1$\beta$(Interleukin-1$\beta$, IL-1$\beta$)、肿瘤坏死因子-$\alpha$(Tumor Necrosis Factor-$\alpha$, TNF-$\alpha$)和一氧化氮(NO)含量,评价不同皮色芜菁块根多糖成分对体外炎症模型的作用,通过 DPPH 和 ABTS 法比较不同皮色芜菁块根体外抗氧化作用差异,筛选出最具抗炎和抗氧化作用的芜菁皮色,为芜菁根在功能保健、食品应用及膳食营养搭配等方面提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

芜菁(*Brassicarapa* L.) 采自中国新疆维吾尔自治区阿克苏地区柯坪县;胎牛血清(FBS)和 DMEM 高糖培养基 美国 Gibco 公司;青-链霉素混合液 碧云天公司;PBS 上海 Cytiva 公司;脂多糖 上海源叶生物科技有限公司;小鼠 IL-6 ELISA 试剂盒、小鼠 TNF-$\alpha$ ELISA 试剂盒、小鼠 IL-1$\beta$ ELISA 试剂盒、CCK8 试剂盒 武汉三鹰生物技术有限公司;一氧化氮(NO)检测试剂盒 碧云天生物科技有限公司;黄芪多糖(纯度≥98.0%) 四川省维克奇生物科技有限公司;芦丁(纯度≥95%) 成都曼思特生物科技有限公司;薯蓣皂苷(纯度≥98.5%) 坛墨质检-标准物质中心;萝卜硫苷(纯度≥98%) 成都健腾生物

技术有限公司；没食子酸（纯度≥99%）　Stanford analytical chemicals Inc；苯酚（分析纯）　天津市福晨化学试剂厂；浓硫酸（分析纯）、乙醇（分析纯）、甲醇（分析纯）、冰乙酸（分析纯）　天津市致远化学试剂有限公司；D-葡萄糖（纯度≥99.0%）　德国 Dr.Ehrenstorfer 公司；氢氧化钠（分析纯）、亚硝酸钠（分析纯）、三氯化铝（分析纯）、香草醛（分析纯）　成都市科隆化学品有限公司。

HS-11-1 数显恒温水浴锅　上海博迅实业有限公司医疗设备厂；Braotum612-10n 电子天平、BSA124A-CW 电子天平　赛多利斯科学仪器（北京）有限公司；SpectraMaxi3 多功能微孔板检测系统　美谷分子仪器；37XB 三目倒置显微镜　上海光学仪器六厂；3311 二氧化碳培养箱　赛默飞世尔科技有限公司；SF-TGL-16M 高速离心机　上海菲恰尔分析仪器有限公司；RT-02A 高速粉碎机　荣聪精密科技有限公司；Alpha2-4 LDplus 冷冻干燥机　德国 CHRIST 公司。

### 1.2　实验方法

1.2.1　芜菁样品前处理　将不同皮色芜菁块根经切块、粉碎至 0.1~0.2 cm 颗粒，利用冷冻干燥机进行干燥、粉碎，过 80 目筛制成粉末状待用。

1.2.2　多糖含量测定

1.2.2.1　标准曲线的绘制　称取 10.0 mg 黄芪多糖标准品，加蒸馏水定容至 10 mL，得到浓度为 1 mg/mL 的黄芪多糖标准品溶液[22]。分别精密量取黄芪多糖标准品溶液 0.0、0.1、0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0 mL 于 7 支 10 mL 具塞试管中加入蒸馏水定容至 1 mL。分别加体积分数 5% 的苯酚试剂 0.32 mL 和浓硫酸 1 mL，充分混匀后，90 ℃ 水浴反应 25 min，用冰水冷却至室温后，在 480 nm 测吸光度 A。随后将浓度 C 作为横坐标（X，mg/mL），以吸光度 A 为纵坐标 Y，绘制线性回归得标准曲线（Y=2.7184X+0.0731，$R^2$=0.9984）。

1.2.2.2　样品测定　分别准确称取 0.1 g 不同皮色芜菁样品粉末于 10 mL 离心管中加 5 mL 蒸馏水，摇匀，用超声提取法提取 0.5 h（条件：600 W，25 ℃），摇匀、过滤、蒸馏水定容至 5 mL。在滤液中加入冰乙醇 20 mL（乙醇终体积分数约为 80%）摇匀，进行醇沉。随后样品离心 5 min（转速 10000 r/min）、弃上清，沉淀中加入 15 mL 蒸馏水，摇匀溶解（必要时超声助溶）即得不同皮色芜菁多糖供试品溶液。取 100 μL 多糖供试品溶液，加入体积分数为 5% 的苯酚溶液 0.32 mL 和浓硫酸 1 mL，充分摇匀后，90 ℃ 水浴反应 25 min，用冰水冷却至室温后，在 480 nm 处检测吸光度，每个样品重复 3 次。按照公式（1）计算样品中总多糖的含量，以 g/100 g 计。

$$X(g/100\,g)=\frac{C\times f\times V}{M\times 1000}\times 100 \qquad 式（1）$$

式中：X：试样中多糖含量，g/100 g；C：供试液中多糖浓度，mg/mL；f：供试液稀释因子；V：提取体积，mL；M：样品质量，g。

1.2.3　黄酮含量测定

1.2.3.1　标准曲线的制备　精密称取芦丁对照品 10.0 mg，用甲醇溶解并定容至 10 mL，再取一定量稀释成 100 μg/mL 标准储备液，2~8 ℃ 保存备用。精密吸取芦丁标准储备液 0、2、5、10、20、30、40、60 μL于 96 孔酶标板上，分别加入质量分数 10% 的三氯化铝（$AlCl_3$）溶液 80 μL，每孔在加入甲醇至 200 μL，用移液器吹吸 20 次使充分混匀。随后样品于 45 ℃ 避光反应 20 min 后，410 nm波长处测定吸光度值。以芦丁浓度（μg/mL）为横坐标，吸光度值为纵坐标，绘制标准曲线（Y=0.0038X−0.0024，$R^2$=0.9992）。

1.2.3.2　样品中黄酮含量的测定　精密称取不同皮色芜菁粉末各 0.1 g，加入 5 mL 体积分数为 70% 的乙醇，超声提取 0.5 h（条件：600 W，25 ℃），摇匀、过滤，收集滤液作为供试品溶液。精密吸取供试液 100 μL于 96 孔酶标板中，加入 80 μL 质量分数为 10% 的 $AlCl_3$ 溶液和 20 μL 甲醇，用移液器反复吹吸 20 次充分混匀后，在 45 ℃ 培养箱中反应 20 min，于 410 nm 波长测定吸光度，每个样品重复 3 次。按式（2）计算供试液中黄酮的含量，以 g/100 g 计。

$$X(g/100\,g)=\frac{C\times f\times V}{M\times 10^6}\times 100 \qquad 式（2）$$

式中：X：试样中总黄酮含量，g/100 g；C：供试液中黄酮浓度，μg/mL；f：供试液稀释因子；V：提取体积，mL；M：样品质量，g。

1.2.4　皂苷含量测定

1.2.4.1　标准曲线的制备　精密称取薯蓣皂苷标准品 10.0 mg，甲醇溶解并定容至 10 mL，即得到 1.0 mg/mL 的薯蓣皂苷标准品溶液。精密吸取薯蓣皂苷标准品溶液 0、10、50、100、200、300、400、500、600、700、800 μL 置于 10 mL 离心管中，通风橱中挥干后，加入 0.2 mL 质量分数 5%的香草醛（用质量分数 35% 的冰乙酸配置）溶液和 0.8 mL 高氯酸（$HClO_4$）充分混匀后，于 60 ℃ 水浴中反应 10 min，待各标准溶液冷却至室温，加入 5 mL冰乙酸，充分混匀后精密吸取 200 μL 加入到 96 孔酶标板上，于 550 nm 处测定吸光度。以吸光度为纵坐标、薯蓣皂苷标准品溶液质量（μg）为横坐标绘制标准曲线（Y=0.0008X+0.0591，$R^2$=0.9994）。

1.2.4.2　样品中皂苷含量的测定　精密吸取 1.2.3.2 中的供试品溶液 200 μL 至 10 mL 离心管，在通风处中自然挥干，加入 0.2 mL 质量分数 5% 的香草醛冰乙酸溶液和 0.8 mL 高氯酸（$HClO_4$）充分混匀后，在 60 ℃ 水浴反应 10 min，供试品溶液冷却至室温，加入 5 mL 冰乙酸，充分混匀后精密吸取 200 μL 加到

酶标板上，在 550 nm 波长下测定吸光度，每个样品重复 3 次。按公式(3)计算含量，以 g/100 g 计。

$$X(g/100\,g)=\frac{C\times f\times V}{M\times 10^6}\times 100 \qquad 式（3）$$

式中：X：试样中总皂苷含量，g/100 g；C：供试液中皂苷含量，μg；f：供试液稀释因子；V：提取体积，mL；M：样品质量，g。

1.2.5 硫代葡萄糖苷含量测定

1.2.5.1 标准曲线的绘制 精密称取萝卜硫苷标准品 10.0 mg，加水溶解并定容至 10 mL，摇匀，即得质量浓度为 1.0 mg/mL 的萝卜硫苷标准品溶液。精密吸取萝卜硫苷标准品溶液 0、1、2、5、10、20、30、40、50 μL 置于 96 孔酶标板上，每孔分别加水至 80 μL，用移液器吹吸混匀，每孔加入质量分数为 0.1% 的羧甲基纤维素钠溶液 80 μL，再加入 0.71 g/L 氯化钯显色剂 40 μL，吹吸混匀 20 次，室温条件下反应 3 h 后，于 520 nm 处测定吸光度。以吸光度为纵坐标、萝卜硫苷标准品溶液质量(μg)为横坐标绘制标准曲线(Y=0.0039X+0.0475，$R^2$=0.9992)。

1.2.5.2 样品中总硫代葡萄糖苷含量测定 精密吸取 1.2.3.2 中的供试品溶液 80 μL，置于 96 孔酶标板上，加入质量分数为 0.1% 的羧甲基纤维素钠溶液 80 μL，再加入 0.71 g/L 氯化钯显色剂 40 μL，吹吸混匀 20 次，室温条件下反应 3 h 后，于 520 nm 处测定吸光度，按照公式(4)计算样品中硫代葡萄糖苷的含量，以 g/100 g 计。

$$X(g/100\,g)=\frac{C\times f\times V}{M\times 10^6}\times 100 \qquad 式（4）$$

式中：X：试样中总硫代葡萄糖苷含量，g/100 g；C：总硫代葡萄糖苷含量，μg；f：供试液稀释因子；V：提取体积，mL；M：样品质量，g。

1.2.6 多酚含量测定

1.2.6.1 标准曲线的绘制 精密称取没食子酸标准品 10.0 mg 溶解并定容至 10 mL，作为没食子酸标准品溶液。将没食子酸标准溶液分别精密吸取 0、2、5、10、20、30、40 μL 于 96 孔酶标板上，依次加入蒸馏水至 100 μL，再加入 20 μL福林-酚试剂和质量分数 10% 的碳酸钠($Na_2CO_3$)溶液 80 μL，用移液器反复吹吸 20 次充分混匀，在 45 ℃ 培养箱中反应 60 min，冷却至室温后，于 765 nm 波长条件测定吸光度值。以没食子酸浓度(μg/mL)为横坐标，吸光度值为纵坐标，绘制标准曲线 Y=0.0269X+0.0696，$R^2$=0.9978。

1.2.6.2 多酚含量的测定 精密吸取 1.2.3.2 中的供试品溶液 10 μL 至 96 孔酶标板，依次加入 90 μL 蒸馏水、20 μL 福林-酚试剂和 80 μL 质量分数 10% 的 $Na_2CO_3$ 溶液，吹吸 20 次充分混匀后在 45 ℃ 培养箱中反应 60 min，冷却至室温后，于 765 nm 波长条件下检测吸光度，每组重复 3 次，按公式(5)计算供试液中多酚含量，以 g/100 g 计。

$$X(g/100\,g)=\frac{C\times f\times V}{M\times 10^6}\times 100 \qquad 式（5）$$

式中：X：试样中总多酚含量，g/100 g；C：供试液中总多酚浓度，μg/mL；f：供试液稀释因子；V：提取体积，mL；M：样品质量，g。

1.2.7 细胞活性测定

1.2.7.1 RAW 264.7 细胞培养 将冻存的 RAW 264.7 细胞复苏，用含 10% 胎牛血清和 1% 青-链霉素的 DEME 高糖培养基于 37 ℃、5% $CO_2$ 饱和湿度的培养箱中培养，当细胞生长至 80%~90% 融合率时，以 1∶2~1∶4 比例进行传代培养，每隔 2~3 d 换液一次，待细胞进入对数增长期后方可进行下一步实验。

1.2.7.2 不同皮色芜菁根提取物的制备 称取 100 mg 课题组前期已制备好的不同皮色芜菁根提取物冻干粉末，加入 2 mL 灭菌水配制成 50 mg/mL 母液，后续实验将其稀释成目标浓度后用于细胞处理。

1.2.7.3 不同皮色芜菁根提取物对 RAW 264.7 细胞炎症模型的作用 为了评估不同皮色芜菁的细胞毒性并确定其后续作用细胞的浓度，将 RAW 264.7 细胞($5\times10^4$ 个/孔)接种到 96 孔板中，并在 37 ℃、含 5% $CO^2$ 环境中培养 16~18 h。然后，加入不同质量浓度的不同皮色芜菁提取物溶液(10、25、50、100、200、400、800、1000 μg/mL)处理 24 h。最后，加入 CCK-8 试剂处理 2 h 后 450 nm 处测定吸光度，按公式(6)计算细胞活力。

$$细胞存活率(\%)=[(As-Ab)/(Ac-Ab)]\times 100 \qquad 式（6）$$

式中：As：实验孔吸光度；Ac：对照孔吸光度；Ab：空白孔吸光度。

将 RAW 264.7 细胞($5\times10^4$ 个/孔)接种于 96 孔板，设空白组、模型组、阳性对照组和药物组，培养 16~18 h。空白组用含 0.05% DMSO 的完全培养基，模型组用含 1 μg/mL 的 LPS 的完全培养基，阳性对照组用共含有 1 μg/mL 的 LPS 和 10 μg/mL 地塞米松的完全培养基处理 24 h，药物处理组细胞分别用含 1 μg/mL 的 LPS 和 100、200、400、800 μg/mL 的不同皮色芜菁根提取物的完全培养基共同处理 24 h，每组 4 个复孔。最后，加入 CCK-8 试剂处理 2 h 后 450 nm 处测定吸光度，按公式(6)计算细胞活力。

1.2.8 细胞 NO 和炎症因子含量检测 将 RAW 264.7 细胞以每孔 $5\times10^4$ 个细胞密度接种于 96 孔板，按照 1.2.7.3 项下描述的方法进行处理后，吸取细胞上清液，按照 NO 分泌量检测试剂盒说明书进行测定。

将 RAW264.7 细胞以 $1\times10^5$ 个/mL 细胞密度接种于 24 孔板，设空白组、模型组、阳性对照组和药物组，每组重复 3 个复孔，培养 16~18 h 后按照 1.2.7.3 方法进行给药处理 24 h 后，收集细胞上清液，

以 3000 r/min 离心 20 min，收集上清液待用。最后，按照 ELISA 试剂盒说明书方法测定不同处理组细胞上清液中 IL-6、TNF-$\alpha$ 和 IL-1$\beta$ 的含量。

1.2.9　体外抗氧化活性检测

1.2.9.1　DPPH 自由基清除能力试验　分别取 30 μL 不同浓度芜菁提取物溶液（0.5、1、2、4、6、8、10 mg/mL），加入 180 μL 浓度 100 μmol/L DPPH-无水乙醇溶液等体积比充分混匀，于酶标板加盖避光，室温静置使其反应 40 min，随后在 516 nm 波长处测定吸光度值，每个样品重复 3 次，按公式（7）计算 DPPH 自由基清除率 R（%）。

$$R(\%)=\left(1-\frac{A_1-A_2}{A_0}\right)\times 100 \qquad 式（7）$$

式中：$A_0$：空白对照吸光度值；$A_1$：样品组吸光度值；$A_2$：无 DPPH 的样品液吸光度值

1.2.9.2　$ABTS^+$自由基清除率测定　分别取 30 μL 不同浓度芜菁提取物溶液（0.5、1、2、4、6、8、10 mg/mL），加入 180 μL 浓度 100 μmol/L ABTS 溶液混合，于酶标板加盖避光，室温静置使其反应 40 min，随后在 734 nm 波长处测定吸光度值，每个样品重复 3 次。按公式（8）进行计算 $ABTS^+$自由基清除率 R（%）。

$$R(\%)=\left(1-\frac{A_1-A_2}{A_0}\right)\times 100 \qquad 式（8）$$

式中：$A_0$：空白对照光度值；$A_1$：样品组的吸光度值；$A_2$：无 ABTS 的样品的吸光度值。

### 1.3　数据处理

采用 Graphpad Prisim 9.0 和 Origin 2019 软件对实验数据结果进行统计学分析及绘图，每个实验结果至少重复三次，所有数据均用均数±标准差表示，多组间均数比较采用单因素方差（One-way ANOVA），$P$<0.05 为差异有统计学意义。

## 2　结果与分析

### 2.1　功能成分含量测定结果

2.1.1　多糖含量测定结果　黄芪多糖浓度（mg/mL）与吸光度的线性关系和不同皮色芜菁多糖含量测定的结果见图 2。黄芪多糖标准曲线为 Y=2.7184X+0.0731（$R^2$=0.9984），通过苯酚-硫酸法测得紫皮、白皮、黄皮芜菁块根多糖平均含量分别为 28.35、9.97、7.43 g/100 g，RSD 值均小于 10%。如图 2 所示，三种皮色芜菁多糖含量经两两比较，紫皮芜菁块根中多糖含量最高，其差异极显著（$P$<0.0001），是白皮和黄皮芜菁多糖含量的 2.5~3.5 倍。白皮和黄皮进行比较，白皮芜菁多糖含量高于黄皮（$P$<0.05）。

2.1.2　黄酮含量测定结果　芦丁浓度（μg/mL）与吸光度的线性关系和不同皮色芜菁黄酮含量测定的结果见图 3。芦丁标准曲线为 Y=0.0038X−0.0024（$R^2$=0.9992），通过 $AlCl_3$ 法测得紫皮、白皮、黄皮芜菁块根黄酮平均含量分别为 0.159、0.156、0.201 g/100 g。如图 3 所示，三种皮色芜菁块根中黄皮芜菁的黄酮含量最高，其差异与紫皮和白皮相比较为显著（$P$<0.001），紫皮和白皮芜菁黄酮含量差异无统计学意义（$P$>0.05）。

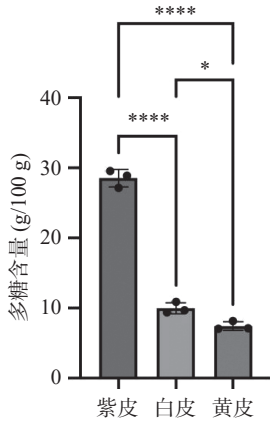



图 2　多糖含量结果

Fig.2　Results of polysaccharide content

注：图中*表示两组之间差异具有统计学意义（$P$<0.05），**表示两组之间差异显著（$P$<0.01），***表示两组之间差异较为显著（$P$<0.001），****表示差异极显著（$P$<0.0001），ns 表示两组之间差异不具有统计学意义，图 2~图 6 同。

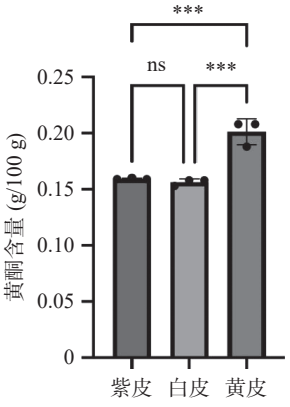



图 3　黄酮含量测定结果

Fig.3　Results of flavonoid content determination

2.1.3　皂苷含量测定结果　薯蓣皂苷质量（μg）与吸光度的线性关系和不同皮色芜菁皂苷含量测定的结果见图 4。薯蓣皂苷标准曲线为 Y=0.0008X+0.0591（$R^2$=0.9994），通过香草醛比色法测得紫皮、白皮、黄皮芜菁块根总皂苷平均含量分别为 3.67、3.40、4.50 g/100 g。经两两比较，与紫皮和白皮芜菁相比黄皮芜菁皂苷含量最高（$P$<0.05），紫皮和白皮之间差异无统计学意义（$P$>0.05）。

2.1.4　硫代葡萄糖苷含量测定结果　萝卜硫苷质量（μg）与吸光度的线性关系和不同皮色芜菁硫代葡萄糖苷含量测定的结果见图 5。萝卜硫苷标准曲线为 Y=0.0039X+0.0475（$R^2$=0.9992），利用氯化钯显色法测得紫皮、白皮、黄皮芜菁中硫代葡萄糖苷平均含量分别为 1.14、2.13、1.54 g/100 g。在三种皮色中白皮芜菁硫代葡萄糖苷含量最高，与其余两组相比差异较

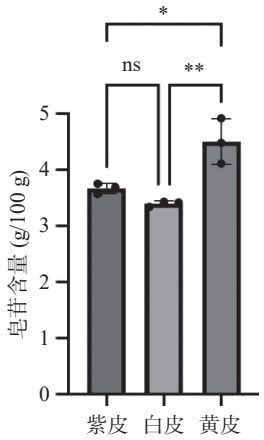



图 4 皂苷含量结果

Fig.4 Results of saponin content

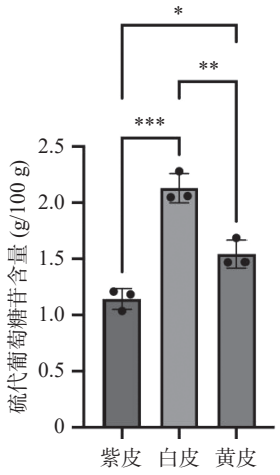



图 5 硫代葡萄糖苷含量结果

Fig.5 Results of glucosinolate content

显著($P$<0.01),黄皮与紫皮芜菁相比具有更高的硫代葡萄糖苷含量,差异具有统计学意义($P$<0.05)。

2.1.5 多酚含量测定结果 没食子酸浓度(μg/mL)与吸光度的线性关系和不同皮色芜菁块根中多酚含量测定的结果见图 6。没食子酸标准曲线为 Y=0.0269X+0.0696($R^2$=0.9978),利用福林-酚法测得紫皮、白皮、黄皮芜菁块根中多酚平均含量分别为

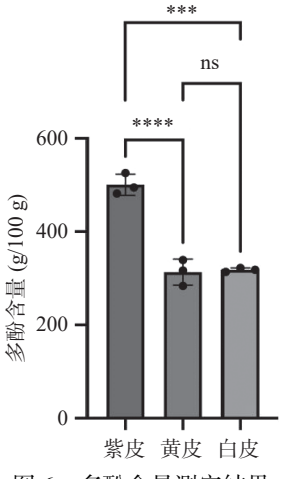



图 6 多酚含量测定结果

Fig.6 Determination results of polyphenol content

500.7、318.05、313.3 g/100 g。可以发现,与白皮和黄皮芜菁相比紫皮芜菁中多酚含量最高,其差异较显著($P$<0.001),白皮和黄皮芜菁之间多酚含量差异无统计学意义($P$>0.05)。

## 2.2 细胞活性检测结果

2.2.1 不同皮色芜菁根提取物对炎症细胞模型的作用

2.2.1.1 不同皮色芜菁对 RAW 264.7 细胞活力的影响 采用 CCK-8 法测定了不同皮色芜菁提取物对 RAW264.7 细胞毒性的作用,结果如图 7 所示。与对照组比较三种皮色芜菁提取物均在 10~1000 μg/mL 浓度范围内,细胞存活率呈现递增的趋势,没有出现毒性作用。可以发现,从 100 μg/mL 开始细胞增长率骤增,表现出显著的细胞增值作用,因此选择 100、200、400 μg/mL 作为后续实验的低、中、高给药剂量。

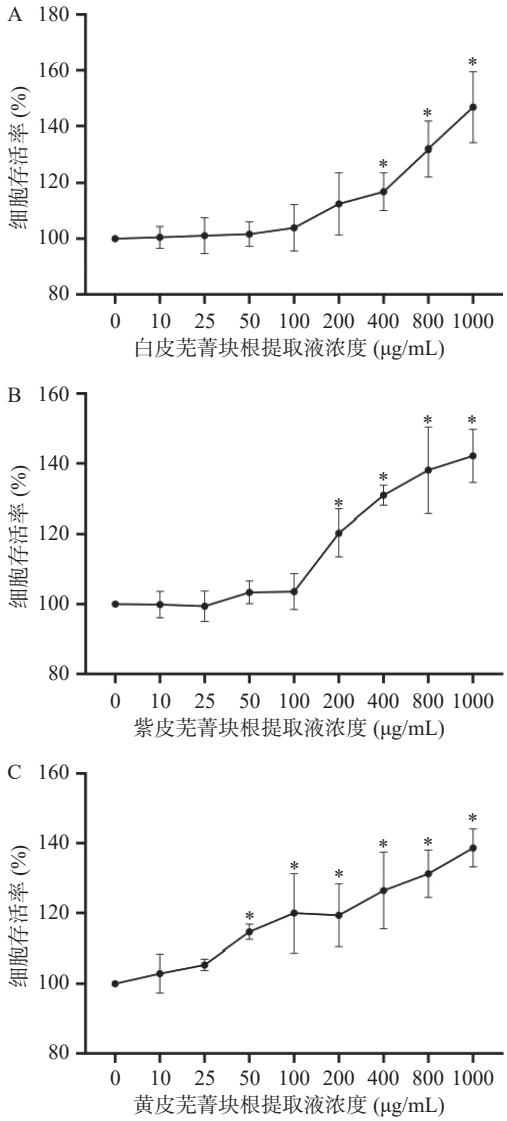



图 7 不同皮色芜菁提取物对 RAW264.7 细胞的毒性

Fig.7 Toxicity of extracts from turnips with different skin colors on RAW264.7 cells

注:A、B、C 分别为白皮、紫皮和黄皮芜菁提取物对 RAW264.7 细胞的毒性;图中*表示各组与对照组比较差异有统计学意义($P$<0.05),0 μg/mL 即空白对照。

2.2.1.2　不同皮色芜菁根对 LPS 诱导的 RAW264.7 细胞存活率的影响　如图 8 所示，不同皮芜菁对 LPS 诱导的 RAW264.7 细胞炎症模型中，对细胞存活率的影响。与对照组比较，加入 LPS 共同处理 RAW264.7 细胞后，LPS 组中细胞存活率有微弱的下降趋势，但是其差异无统计学意义（$P$>0.05）。为了进一步确认建模是否成功，用倒置显微镜对对照组和 LPS 组的细胞进行了形态观察，发现与对照组相比，LPS 组细胞形态发生明显的变化。如图 8D 和图 8E 所示，对照组细胞呈圆形、状态饱满和透亮，无伪足，经 LPS 处理后圆形细胞数量变少，细胞由圆形变成长梭形，伪足明显增多。如图 8F~图 8H 所示，经 200 μg/mL 白皮、紫皮、黄皮芜菁提取物处理后，与 LPS 组比较，细胞形态明显改善，圆形、饱满、透亮的活细胞数量明显增多。申文静等[23] 评价牧蒿提取物对 RAW264.7 细胞炎症模型时发现，模型组经 LPS 处理后 RAW264.7 细胞发生显著的变化，与对照组相比，大部分细胞由圆形变成长梭形状态，且细胞伪足明显增多，此结果与本研究一致，说明模型建立成功。如图 8A、图 8B、图 8C 所示，与 LPS 组比较，地塞米松阳性对照组细胞活力明显升高（$P$<0.05），当 LPS 与 100、200、400 μg/mL 浓度的不同皮色芜菁提取物共同处理细胞后，均能够使细胞活性显著升高（$P$<0.05），呈剂量依赖性。

2.2.2　不同皮色芜菁根提取物对细胞炎症因子的影响　如图 9 所示，不同皮色芜菁提取物对 LPS 诱导的 RAW264.7 细胞炎症模型中，细胞因子分泌水平的影响。与对照组相比，LPS 组中的 NO、IL-6、TNF-$\alpha$ 和 IL-1$\beta$ 水平显著增加（$P$<0.05）。与 LPS 组相比，地塞米松阳性对照组和 100、200、400 μg/mL 浓度不同皮色芜菁提取物能够显著降低 NO、IL-6、TNF-$\alpha$ 和 IL-1$\beta$ 等炎症因子水平（$P$<0.05），且紫皮和白皮芜菁的抑制炎症因子的作用呈现剂量依赖性。可以发现，与白皮和黄皮比较紫皮芜菁提取物与 LPS 共同处理时 IL-6、TNF-$\alpha$ 和 IL-1$\beta$ 的水平更低，提示在三种皮色中紫皮芜菁的抑制炎症因子作用最强。

2.2.3　不同皮色芜菁块根提取物抗氧化活性　对三种皮色芜菁提取物体外抗氧化能力进行了比较，如图 10 所示，白皮、紫皮、黄皮芜菁提取物对 DPPH·清除率分别为 47.26%±0.76%、38.10%±0.27%、63.42%±0.35%，对 $ABTS^{+}$·清除率分别为 81.18%、87.30%、99.73%。可以发现，黄皮芜菁提取物的 DPPH·和 $ABTS^{+}$·清除率最高，说明黄皮芜菁的抗氧

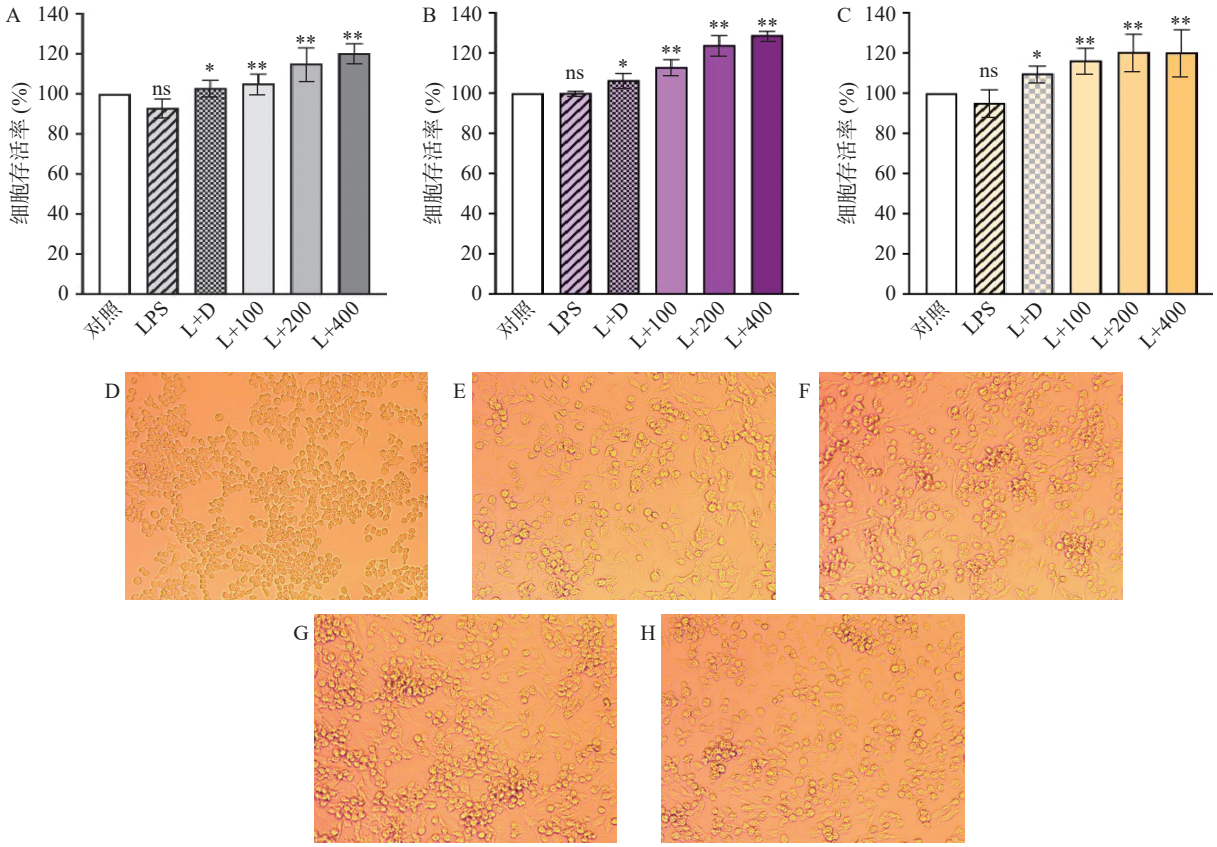



图 8　不同皮色芜菁提取物对 RAW264.7 细胞炎症模型的影响

Fig.8　Effects of extracts from turnips with different skin colors on the inflammatory model of RAW264.7 cells

注：A、B、C 分别为白皮、紫皮、黄皮芜菁提取物对 LPS 诱导的 RAW264.7 细胞炎症模型中细胞存活率的影响；D. 对照组 RAW264.7 细胞形态；E. LPS 组细胞形态；F、G、H 分别为白皮、紫皮、黄皮芜菁提取物处理 LPS 模型中 RAW264.7 细胞形态；*表示各组与对照组比较差异有统计学意义（$P$<0.05），**表示各芜菁提取物处理组与 LPS 组之间具有显著统计学差异（$P$<0.01），ns 表示两组间差异无统计学意义。

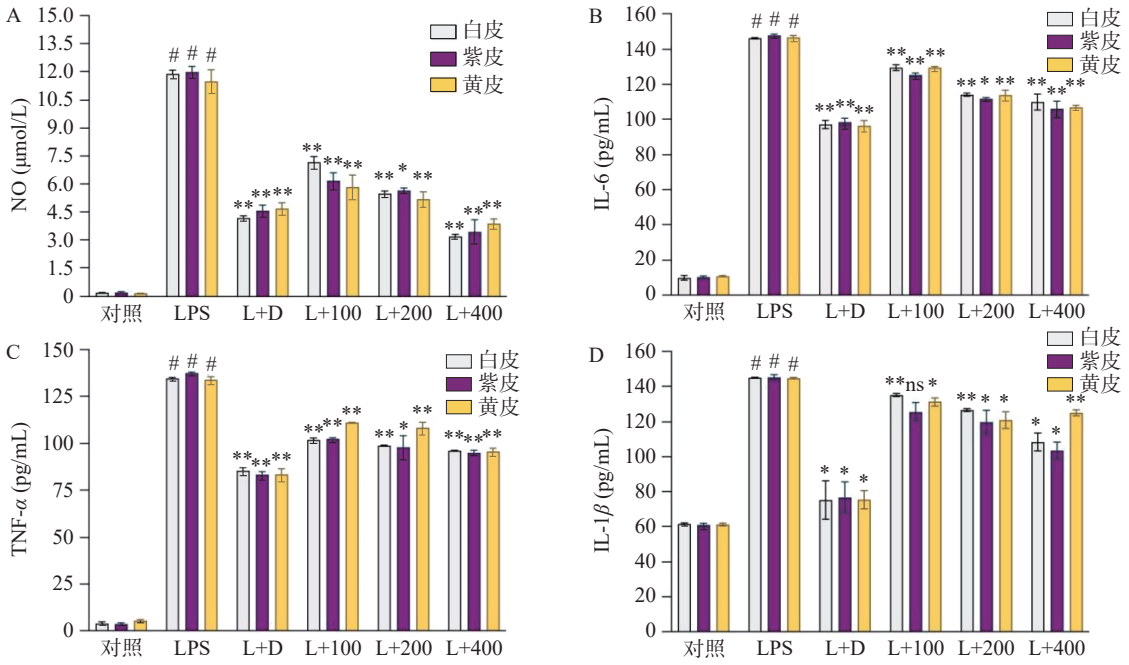



图 9 不同皮色芜菁提取物对炎症因子的影响

Fig.9 Effects of extracts from turnips with different skin colors on inflammatory factors

注: A、B、C、D 分别为不同皮色芜菁提取物对 LPS 诱导的 RAW264.7 细胞炎症模型中 NO、IL-6、TNF-$\alpha$ 和 IL-1$\beta$ 水平的影响; #表示 LPS 组与对照组比较差异具有统计学意义($P$<0.05); *表示地塞米松组和芜菁处理组与 LPS 组比较差异有统计学意义($P$<0.05); **表示给芜菁提取物处理组与 LPS 组之间具有显著统计学差异($P$<0.01), ns 表示两组间差异无统计学意义。

化作用最强。结合含量测定结果, 黄皮芜菁表现出更强的抗氧化作用可能与其更高的黄酮和皂苷含量有关。

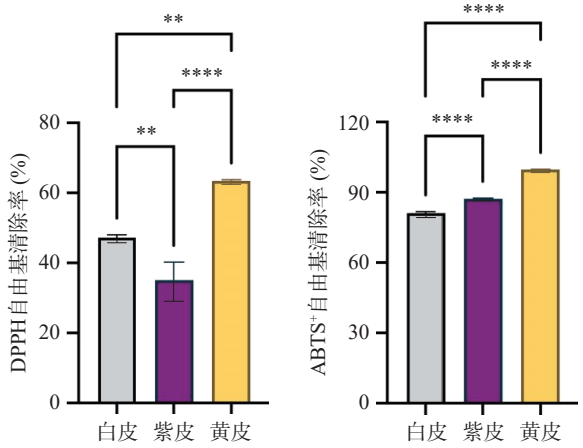



图 10 不同皮色芜菁提取物体外抗氧化作用的比较

Fig.10 Comparison of the *in vitro* antioxidant effects of extracts from Turnips with different skin colors

注: **表示两组之间差异显著($P$<0.01), ****表示两组之间差异极显著($P$<0.001)。

## 3 讨论

长期慢性炎症会增加心血管系统、代谢和神经退行性疾病以及癌症的风险[24−25]。脂多糖(LPS)刺激 RAW264.7 细胞产生的 IL-1$\beta$、IL-6 和 TNF-$\alpha$ 被认为是促进炎症反应最重要的细胞因子, 可导致急性炎症性疾病和组织损伤[26], 这种过多的促炎细胞因子可导致全身性炎症。因此, 抑制促炎细胞因子 IL-1$\beta$、IL-6 和 TNF-$\alpha$ 的表达可以减轻炎症反应, 也是预防或治疗炎症相关疾病的重要策略。

芜菁作为一种药食同源类植物, 所含的多糖、黄酮、皂苷、硫代葡萄糖苷等功效成分与其多种药理活性有很大关系[6,27]。多糖的抗炎作用已被广泛报道, 其可通过抑制 NF-$\kappa$B 通路减少 NO、IL-6 等炎症因子的释放[24,28]。本研究中紫皮芜菁的多糖(28.35 g/100 g)和多酚(500.7 g/100 g)含量显著高于其他两组($P$<0.001), 同时紫皮芜菁提取物也显著降低 LPS 诱导的 IL-6、TNF-$\alpha$ 和 IL-1$\beta$ 水平($P$<0.05)且呈剂量依赖性, 并且考虑到多糖是水溶性较强的成分, 因此, 推测紫皮芜菁在 RAW264.7 炎症模型中表现出的最强抗炎活性可能与其富含的多糖和多酚成分密切相关。黄酮类化合物通过提供氢原子中和自由基[29], 而皂苷则通过增强抗氧化酶活性发挥作用[30]。本研究中黄皮芜菁的体外抗氧化活性较其余两组高, 可能与其更高的黄酮(0.201 g/100 g)和皂苷(4.50 g/100 g)含量有关, 这也表明黄皮芜菁在抗氧化功能食品开发中具有潜力。白皮芜菁的硫代葡萄糖苷含量(2.13 g/100 g)显著高于其他两组($P$<0.01), 硫代葡萄糖苷的降解产物(如异硫氰酸盐)已被证实具有抗癌和抗微生物活性[11,21,31], 但其在本研究中的抗炎作用较弱, 提示其活性可能依赖于特定代谢途径或与其他成分的协同效应, 需进一步研究。

三种皮色中紫皮芜菁提取物对 IL-6 和 TNF-$\alpha$ 的抑制效果尤为显著($P$<0.05), 可能与多糖通过 TLR4/MyD88 信号通路抑制 NF-$\kappa$B 活化有关[24]。值得注意的是, 黄皮芜菁虽抗氧化能力最强, 但其抗炎活性弱于紫皮芜菁, 提示抗氧化与抗炎活性的分子

机制可能存在差异，需要进一步研究证实。

## 4　结论

本研究结果表明，不同皮色芜菁的功能成分含量及生物活性存在显著差异。紫皮芜菁的多糖和多酚含量最高，其提取物在 RAW264.7 细胞炎症模型中表现出最强的抗炎活性，黄皮芜菁的黄酮和硫代葡萄糖苷含量较高，并展现出最优的自由基清除能力，白皮芜菁则以硫代葡萄糖苷含量最为突出。基于上述结果，紫皮芜菁可能更适合用于抗炎功能产品的开发，黄皮芜菁可作为抗氧化食品的优选原料，而白皮芜菁在硫代葡萄糖苷相关研究中具有独特价值。本研究为芜菁的功能性成分研究与高值化利用提供了科学依据，未来可进一步探究其功能成分的协同作用及体内代谢机制。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

## 参考文献


［1］ 陈文彬，石会玲. 芜菁功能成分及其功能性食品研究进展[J]. 食品安全质量检测学报，2025，16(7)：148−156. ［CHEN Wenbin, SHI Huiling. Research progress on functional components and functional foods of *Brassica rapa* L.[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(7): 148−156.］

［2］ BIRD K A, AN H, GAZAVE E, et al. Population structure and phylogenetic relationships in a diverse panel of *Brassica rapa* L.[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 321.

［3］ PAUL S, GENG C G, YANG T H, et al. Phytochemical and health-beneficial progress of turnip (*Brassica rapa*)[J]. Journal of Food Science, 2019, 84(1): 19−30.

［4］ 王证德，平措绕吉，刘莹，等. 芜菁的化学成分和生物活性研究进展[J]. 中南药学，2023，21(9)：2391−2399. ［WANG Zhengde, PING Cuoraoji, LIU Ying, et al. Research progress in chemical constituents and biological activities of *Brassica rapa* L[J]. Central South Pharmacy, 2023, 21(9): 2391−2399.］

［5］ 张涛，安熙强，程江南，等. 维药恰玛古的化学成分及生物活性研究进展[J]. 中国药房，2017，28(7)：982−986. ［ZHANG Tao, AN Xiqiang, CHENG Jiangnan, et al. Research progress on chemical constituents and biological activities of the uygur medicine chamagu[J]. China Pharmacy, 2017, 28(7): 982−986.］

［6］ 马一栋，李晓娟，赵孟良，等. 不同芜菁种质资源营养品质分析及综合评价[J]. 食品与发酵工业，2021，47(19)：277−287. ［MA Yidong, LI Xiaojuan, ZHAO Mengliang, et al. Evaluation of nutrient components of different turnip germplasm resources[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(19): 277−287.］

［7］ 于翠翠，张文会，陈锋. 不同提取方法下芜菁功能成分及抗氧化活性测定[J]. 农产品加工，2022(18)：68−70,73. ［YU Cuicui, ZHANG Wenhui, CHEN Feng. Determination of functional components and antioxidant activity of turnips under different extraction methods[J]. Farm Products Processing, 2022(18): 68−70,73.］

［8］ XIE Yue, JIANG Siping, SU Donghai, et al. Composition analysis and anti-hypoxia activity of polysaccharide from *Brassica rapa* L.[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2010, 47(4): 528−533.

［9］ 海力茜·陶尔大洪，马桂芝，王菁，等. HPLC 测定维药恰玛古儿药材中槲皮素的含量[J]. 中国现代应用药学，2013，30(2)：169−171. ［TAOERDAHONG H, MA G Z, WANG J, et al. Content determination of quercetin in *Brassica rapa* L. by HPLC[J]. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy, 2013, 30(2): 169−171.］

［10］ 陈易彬，刘艺. 合阳蔓菁化学成分预试验及其药理活性研究[J]. 食品科技，2011，36(3)：106−108,112. ［CHEN Yibin, LIU Yi. Preliminary test of chemical components and research of pharmacological activity of Heyang *Brassica rapa* L.[J]. Food Science and Technology, 2011, 36(3): 106−108,112.］

［11］ HONG E, KIM G H. Anticancer and antimicrobial activities of *β*-phenylethyl isothiocyanate in *Brassica rapa* L.[J]. Food Science and Technology Research, 2008, 14(4): 377−382.

［12］ BENALAYA I, ALVES G, LOPES J, et al. A review of natural polysaccharides: Sources, characteristics, properties, food, and pharmaceutical applications[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2024, 25(2): 1322.

［13］ 李巧娟，肖春霞，张洪亮. 维药恰玛古的研究现状[J]. 新疆中医药，2010，28(6)：81−83. ［LI Qiaojuan, XIAO Chunxia, ZHANG Hongliang. Research status of the uygur medicine chamagu[J]. Xinjiang Journal of Traditional Chinese Medicine, 2010, 28(6): 81−83.］

［14］ CHEN Z E, WUFUER R, JI J H, et al. Structural characterization and immunostimulatory activity of polysaccharides from *Brassica rapa* L.[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(44): 9685−9692.

［15］ HOSSEINI SE, ZAHIRI S, AQABABA H. Effect of alcoholic extract of *Brassica rapa* root on formalin test pain in adult male rats[J]. Horizon Med Sci, 2013, 19(3): 161−166.

［16］ 卡地尔亚·库尔班，阿吉然姆·阿布拉，陈卓尔，等. 芜菁酸性多糖结构及对脂多糖诱导肺损伤小鼠的保护作用[J]. 食品科学，2023，44(13)：52−59. ［KUERBAN K, ABULA A, CHEN Z E, et al. Structure of an acidic polysaccharide from *Brassica rapa* L. and its protective effect on lipopolysaccharide-induced lung injury in mice[J]. Food Science, 2023, 44(13): 52−59.］

［17］ LI Yunhong, HAN Jianxin, CHEN Yufeng, et al. P-Coumaric acid as a prophylactic measure against normobaric hypoxia induced pulmonary edema in mice[J]. Life Sciences, 2018, 211: 215−223.

［18］ KIM Y H, KIM Y W, OH Y J, et al. Protective effect of the ethanol extract of the roots of *Brassica rapa* on cisplatin-induced nephrotoxicity in LLC-PK1 cells and rats[J]. Biological & Pharmaceutical Bulletin, 2006, 29(12): 2436−2441.

［19］ SHIN S Y, MOH S H, HWANG Y J. Biological activities of-*Brassica rapa*(Turnip) callus extracts by plant cell culture technology[J]. Journal of Plant Biotechnology, 2016, 43(2): 248−254.

［20］ CAO Qingsui, WANG Ge, PENG Ye. A critical review on phytochemical profile and biological effects of turnip (*Brassica rapa* L.)[J]. Frontiers in Nutrition, 2021, 8: 721733.

［21］ 岳丽，祖力皮牙·买买提，王佳敏，等. 基于顶空气相-离子迁移色谱的不同品种芜菁挥发性成分分析[J]. 食品与发酵工业，2025，51(4)：309−318. ［YUE L, MAIMAITI Z, WANG J M, et al. Analysis of volatile compounds in different varieties of *Brassica rapa* L. by headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(4): 309−318.］

［22］ 许璐，伊木然江·苏布哈提，谢军，等. 恰玛古多糖含量测定方法的优化[J]. 食品安全质量检测学报，2024，15(18)：252−262. ［XU L, SUBUHATI Y, XIE J, et al. Optimization of the method for the determination of polysaccharide content in *Brassica rapa*

L[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(18): 252−262. ]
[23] 申文静, 郭容, 龚松, 等. 牡蒿对脂多糖诱导的 RAW 264.7 细胞炎症模型的抗炎作用及其机制[J]. 现代药物与临床, 2025, 40(1): 9−14. [SHEN Wenjing, GUO Rong, GONG Song, et al. Anti-inflammatory effects and mechanisms of *Artemisia japonica* on lipopolysaccharide-induced RAW 264.7 macrophages[J]. Drugs & Clinic, 2025, 40(1): 9−14. ]
[24] WANG Yalin, LAI Li, TENG Liping, et al. Mechanism of the anti-inflammatory activity by a polysaccharide from *Dictyophora* indusiata in lipopolysaccharide-stimulated macrophages[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 126: 1158−1166.
[25] CHOI W S, SHIN P G, BOK Y Y, et al. Anti-inflammatory effects of *Sparassis crispa* extracts[J]. Journal of Mushroom, 2013, 11(1): 46−51.
[26] XU Jiajia, GONG Lili, LI Yuanyuan, et al. Anti-inflammatory effect of a polysaccharide fraction from *Craterellus cornucopioides* in LPS-stimulated macrophages[J]. Journal of Food Biochemistry, 2021, 45(8): e13842.
[27] JIN Hongzhen, LI Maohua, TIAN Feng, et al. An overview of antitumour activity of polysaccharides[J]. Molecules, 2022, 27(22): 8083.
[28] WANG Weixiang, LIU Jingjing. Efficient extraction, antioxidant activities and anti-inflammation of polysaccharides from *Notopterygium* franchetii Boiss[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 248: 116783.
[29] 黄云龙. 植物黄酮类化合物研究进展[J]. 中国果菜, 2025, 45(1): 71−79. [HUANG Yunlong. Advances in research on flavonoid compounds in plants[J]. China Fruit & Vegetable, 2025, 45(1): 71−79. ]
[30] MORSHED M N, AHN J C, MATHIYALAGAN R, et al. Antioxidant activity of *Panax ginseng* to regulate ROS in various chronic diseases[J]. Applied Sciences, 2023, 13(5): 2893.
[31] WANG Jiaqi, JIANG Hong, CHEN Suxue, et al. Strategy for preparing of glucosinolate derivatives with outstanding functional activities based on myrosinase[J]. Food Chemistry, 2025, 479: 143778.