

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.80308

# 铁皮石斛典型黄酮抗氧化活性及分子机制研究

王旖雪<sup>1</sup> 覃思<sup>1</sup> 周润泽<sup>1</sup> 吕承豪<sup>2</sup>

(1. 湖南农业大学食品科学技术学院, 湖南 长沙 410128; 2. 湖南农业大学生物科学技术学院, 湖南 长沙 410128)

**摘要:** [目的] 探究铁皮石斛中典型黄酮芹菜素及其糖苷化合物的抗氧化活性及分子机制。[方法] 通过 DPPH 自由基清除试验检测芹菜素及其糖苷化合物的抗氧化活性, 并通过 Western Blotting 技术检测其对 HepG2 细胞中抗氧化蛋白表达的影响。[结果] 牡荆素的抗氧化能力显著强于芹菜素和 New Zealand 牡荆苷 II, 对 DPPH 自由基清除率的 IC<sub>50</sub> 值为 43.48 mmol/L; 细胞 MTT 试验证实, 芹菜素 (≤20 μmol/L)、牡荆素以及 New Zealand 牡荆苷 II (≤80 μmol/L) 对 HepG2 细胞无毒性; 在正常 HepG2 细胞中, 5 μmol/L 芹菜素相较于其糖苷化合物, 显著上调抗氧化蛋白 Nrf2 和 NQO1 的表达; 在 t-BHP 诱导的氧化应激模型中, 芹菜素可通过诱导 Nrf2 核易位, 激活 NQO1、HO-1 及 Nrf2 的表达, 提升 SOD 活性、增加 GSH 含量, 显著减轻氧化损伤。[结论] 铁皮石斛黄酮芹菜素可通过激活 Nrf2 通路来发挥显著的抗氧化功效。

**关键词:** 铁皮石斛黄酮; 芹菜素; Nrf2 信号通路; 抗氧化

## Antioxidant activity and molecular mechanisms of typical flavonoids in *Dendrobium officinale*

WANG Yixue<sup>1</sup> QIN Si<sup>1</sup> ZHOU Runze<sup>1</sup> LYU Chenghao<sup>2</sup>

(1. School of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China;

2. College of Bioscience and Biotechnology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China)

**Abstract:** [Objective] To explore the antioxidant activity and molecular mechanism of the typical flavonoid apigenin and its glycoside compounds in *Dendrobium officinale*. [Methods] The antioxidant activities of apigenin and its glycoside compounds were assessed using the DPPH free radical scavenging assay, and their effects on the expression of antioxidant proteins in HepG2 cells were examined by Western blot. [Results] Vitexin exhibited significantly stronger antioxidant activity than apigenin and New Zealand vitexin II, with an IC<sub>50</sub> value for DPPH radical scavenging of 43.48 mmol/L. MTT assays confirmed that apigenin (20 μmol/L), vitexin, and New Zealand vitexin II (80 μmol/L) were non-toxic to HepG2 cells. In normal HepG2 cells, 5 μmol/L apigenin significantly upregulated the expression of the antioxidant proteins Nrf2 and NQO1 compared with its glycoside compounds. In the t-BHP-induced oxidative stress model, apigenin significantly alleviated oxidative damage by promoting nuclear translocation of Nrf2, activating the expression of NQO1, HO-1, and Nrf2, enhancing SOD activity, and increasing GSH content. [Conclusion] The flavonoid apigenin in *D. officinale* exerts significant antioxidant effects by activating the Nrf2 signaling pathway.

**Keywords:** *Dendrobium officinale* flavonoids; apigenin; Nrf2 signaling pathway; antioxidant

活性氧 (ROS) 是指在生物体内与氧化代谢有关的、含氧自由基和易形成自由基的过氧化物的总称。正常生理条件下, 机体处于氧化还原平衡状态。一旦大量暴露于 ROS 条件中, 机体会产生包括 DNA 损伤、脂质过氧化等

氧化损伤, 从而产生氧化应激防御<sup>[1]</sup>。此类氧化损伤往往与一系列慢性疾病的发生发展相关, 例如肥胖、糖尿病、阿尔兹海默症等<sup>[2]</sup>。

核因子红细胞 2 (NFE2) 相关因子 2 (Nrf2) 在机体调

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2019YFC1604903, 2022YFC2010100); 湖南省自然科学基金 (编号: 2023JJ30295)

通信作者: 覃思 (1981—), 男, 湖南农业大学教授, 博士。E-mail: qinsiman@hunau.edu.cn

收稿日期: 2025-02-03 改回日期: 2025-06-13

引用格式: 王旖雪, 覃思, 周润泽, 等. 铁皮石斛典型黄酮抗氧化活性及分子机制研究[J]. 食品与机械, 2025, 41(7): 130-136.

Citation: WANG Yixue, QIN Si, ZHOU Runze, et al. Antioxidant activity and molecular mechanisms of typical flavonoids in *Dendrobium officinale*[J]. Food & Machinery, 2025, 41(7): 130-136.

控氧化还原平衡过程中发挥着关键作用,被认为是多种酶促抗氧化剂和Ⅱ期解毒酶关键因子<sup>[3]</sup>。当机体处于正常生理状态时,Nrf2与Keap1结合保留在细胞质内而失活<sup>[4]</sup>;当机体暴露在氧化应激环境下,Nrf2积累并易位到细胞核中,与抗氧化反应原件(ARE)结合,进而诱导下游Ⅱ期酶的表达,如AD(P)H醌氧化还原酶-1(NQO1)、血红素加氧酶-1(HO-1)等<sup>[5]</sup>。因此,激活Nrf2-ARE通路是抗氧化的有效策略之一。

铁皮石斛(*Dendrobium officinale*)为兰科石斛属植物,于2023年被正式列为药食同源物质<sup>[6-7]</sup>,其含有丰富的生物活性化合物,如黄酮、联苯、多糖及生物碱<sup>[8-9]</sup>。Xu等<sup>[10-12]</sup>研究发现,铁皮石斛及其所含生物活性成分具有抗氧化、抗炎、免疫调节等多种生物学活性,展现出抗癌、抗糖尿病、保护心血管、调节胃肠、保护肝、保护肺、保护神经等功效。黄酮类化合物为铁皮石斛中除多糖外的主要活性成分之一,在铁皮石斛的品质评价中起着重要作用<sup>[13]</sup>。孙凤婷等<sup>[14]</sup>研究发现,芹菜素为铁皮石斛中主要的黄酮类成分之一。Si等<sup>[15]</sup>研究发现,牡荆素为铁皮石斛中主要的黄酮类化合物。牡荆素可通过激活Nrf2抑制肾小管上皮细胞铁死亡<sup>[16]</sup>。梁芷韵等<sup>[13]</sup>发现,新西兰牡荆苷Ⅱ是铁皮石斛的主要共有成分。新西兰牡荆苷Ⅱ具有一定的抗氧化性<sup>[17]</sup>。此外,牡荆素和新西兰牡荆苷Ⅱ是由芹菜素作为母体化合物衍生而来的类黄酮苷。Zhang等<sup>[18]</sup>研究表明,芹菜素(Api)、牡荆素(Vit)和新西兰牡荆苷Ⅱ(Vic)均具有潜在的抗炎和抗氧化性。研究拟采用体外细胞试验,探究铁皮石斛黄酮类成分芹菜素及其糖苷化合物牡荆素、新西兰牡荆苷Ⅱ的抗氧化作用,明确其细胞内抗氧化效果,揭示铁皮石斛黄酮类化合物在细胞水平的抗氧化机制,旨在为开发基于天然产物的抗氧化功能食品提供依据。

## 1 材料与与方法

### 1.1 材料与仪器

#### 1.1.1 材料与试剂

芹菜素:纯度≥98%,上海源叶生物科技有限公司;

牡荆素:纯度≥98%,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

新西兰牡荆苷Ⅱ:纯度≥98%,成都乐美天医药科技有限公司;

过氧化氢叔丁醇(t-BHP):70%,上海麦克林生化科技股份有限公司;

胎牛血清(FBS):上海道鹏生物科技有限公司;

HepG2细胞:华中农业大学;

MEM培养基、胰酶、青霉素—链霉素和胰蛋白酶-EDTA(0.25%):美国Thermo Fisher Scientific公司;

SDS-PAGE上样缓冲液(4×):北京索莱宝科技有限公司;

BCA蛋白检测试剂盒:加拿大Biosharp公司;

细胞核蛋白与细胞浆蛋白抽提试剂盒:碧云天生物技术有限公司;

超氧化物歧化酶(SOD)、谷胱甘肽(GSH)试剂盒:中国南京建成生物工程研究所;

过氧化氢酶(CAT)试剂盒:苏州科铭生物技术有限公司;

Nrf2、NQO1、HO-1、 $\beta$ -actin抗体:美国Cell Signaling Technology公司。

#### 1.1.2 主要仪器设备

垂直电泳仪:Mini-PROTEAN®Tetra型,美国Bio-Red公司;

多功能酶标仪:A51119600C型,美国Thermo Fisher Scientific公司;

超净工作台:SW-CJ-1FD型,苏州净化设备有限公司;

高速台式冷冻离心机:H1650R型,湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;

生物分子成像仪:Amersham imagequant 800型,瑞典Cytiva公司。

## 1.2 方法

1.2.1 DPPH自由基清除率试验 配制pH 5.5、浓度为0.1 mmol/L的乙酸钠缓冲液,现用现配,分别制备0~80 mmol/L浓度梯度的样品溶液与用于构建标准曲线的Trolox溶液。96孔板中,每孔加入10  $\mu$ L样品,再加入190  $\mu$ L浓度为0.1 mmol/L的乙酸钠缓冲液,混匀后添加50  $\mu$ L质量浓度为0.2 mg/mL的DPPH试剂,室温避光反应30 min,用酶标仪测定492 nm处吸光值。

1.2.2 细胞复苏、培养以及传代 复苏时,将HepG2细胞接种于10 cm培养皿,置于含1%青霉素—链霉素和10%胎牛血清的MEM培养基中,于37  $^{\circ}$ C、5% CO<sub>2</sub>培养箱中培养。待细胞融合度达到80%~90%时进行传代,传代密度为1.0 $\times$ 10<sup>6</sup>细胞/10 cm培养皿,选用第2~12代的细胞。

1.2.3 细胞活力试验 采用MTT法检测芹菜素、牡荆素以及新西兰牡荆苷Ⅱ对HepG2细胞活力的影响。将HepG2细胞以1 $\times$ 10<sup>5</sup>细胞/孔的密度接种96孔板中,培养24 h使其完全贴壁。弃去原培养基,加入含有不同浓度(5, 10, 20, 40, 80  $\mu$ mol/L)样品的培养基,孵育24 h。向每孔加入10  $\mu$ L MTT溶液,于培养箱内显色反应4 h,手动破碎细胞,测定595 nm处吸光度,并按式(1)计算细胞活力。

$$C = \frac{A_1 - A_0}{A_2 - A_0} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

C——细胞活力,%;

A<sub>0</sub>——试剂空白对照样本的吸光度值;

A<sub>1</sub>——待测样品的吸光度值;

A<sub>2</sub>——细胞对照样本的吸光度值。

1.2.4 氧化损伤细胞模型建立及细胞内CAT、SOD和GSH测定 选取处于对数生长期的HepG2细胞,以1 $\times$ 10<sup>5</sup>细胞/孔的密度接种至96孔板中,于培养箱中孵育

24 h,使细胞充分贴壁并处于良好生长状态。弃掉原培养基,分别加入含有不同浓度(100, 200, 300, 400, 500 μmol/L)过氧叔丁醇(t-BHP)的新培养基,以诱导细胞产生不同程度的氧化应激反应。持续培养 2 h 后,采用 CCK8 法测定细胞活力。

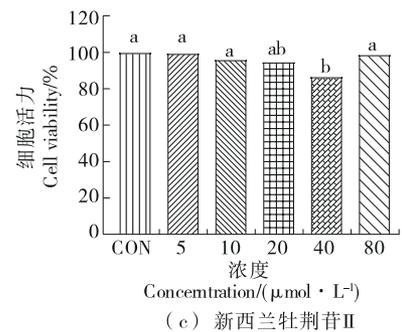
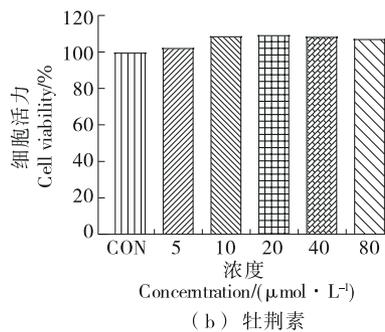
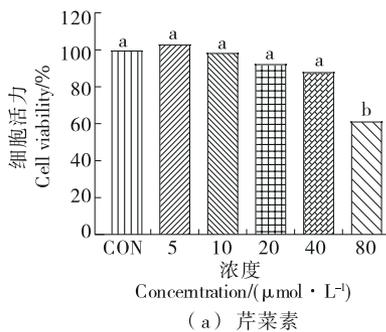
此外,将 HepG2 细胞以  $1 \times 10^6$  细胞/6 cm 培养皿的密度均匀接种于 6 cm 培养皿中,培养 24 h,待细胞贴壁融合至适当程度,使用不同浓度的待测样品处理细胞 6 h。弃去原培养基,加入含有 t-BHP 的培养基,诱导细胞发生氧化损伤。经 2 h 的氧化应激诱导后,回收细胞样本,测定细胞内过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)以及谷胱甘肽(GSH)含量。

1.2.5 细胞分离 细胞培养后,加入 PBS 溶液,用细胞刮刀刮下细胞,并转移至 1.5 mL EP 管中。4 °C、3 000 r/min 离心 5 min,弃去上清液,加入细胞质蛋白抽提试剂 A 进行重悬操作,冰浴 15 min,加入细胞质蛋白抽提试剂 B,漩涡后冰浴 1 min。4 °C、14 000 ×g 离心 15 min,得上清液即为细胞质部分,将其转至 EP 管后于 -20 °C 贮藏保存。沉淀所得的核部分,用细胞核蛋白抽提试剂对其进行重悬,每隔 1~2 min 漩涡 30 s,共 30 min。14 000 ×g 离心 15 min,所获上清液即为细胞核部分,上清液转至新预冷 EP 管,于 -20 °C 贮藏保存。使用 BCA 蛋白定量试剂盒测定细胞质和细胞核蛋白浓度。

1.2.6 蛋白质免疫印迹试验(Western Blotting) 采用细胞裂解液提取并回收细胞总蛋白,将蛋白样本于 100 °C 金属浴中加热 7 min。冷却,通过 SDS-PAGE 电泳分离蛋白,随后转移至 PVDF 膜上。以 5% 脱脂奶粉封闭 1 h,依次加入一抗(4 °C 孵育过夜)与二抗(室温振荡孵育 1 h)。于 PVDF 膜表面均匀滴加显影液,利用生物分子成像仪曝光成像,选用 Image J 软件分析蛋白质条带灰度值,进而对蛋白质表达定量。

1.3 数据统计分析

采用 GraphPad Prism 8.0.2 软件绘图,采用和 SPSS 进行统计学分析。



字母不同表示差异显著 (P < 0.05)

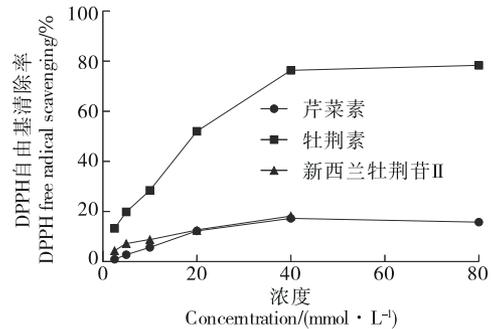
图 2 3 种黄酮物质对 HepG2 细胞活力的影响

Figure 2 Effects of three flavonoids on HepG2 cell viability

2 结果与分析

2.1 DPPH 自由基清除效应

由图 1 可知,随着样品浓度的增加,芹菜素、牡荆素和 新西兰牡荆苷 II 3 种物质对 DPPH 自由基的清除能力均有所增加,但芹菜素与 新西兰牡荆苷 II 的 DPPH 自由基清除率整体低于牡荆素。相比之下,牡荆素的 DPPH 自由基清除率上升趋势显著,在 40 mmol/L 后趋于稳定并维持在较高水平。经计算,牡荆素对 DPPH 自由基清除率的 IC<sub>50</sub> 值为 43.48 mmol/L。综上,牡荆素的 DPPH 自由基清除能力强于芹菜素和 新西兰牡荆苷 II,与 Kyshyap 等<sup>[19]</sup>的结论一致。芹菜素对 DPPH 自由基的清除能力较低,可能是因为芹菜素结构中只有一个羟基。而牡荆素和 新西兰牡荆苷 II 为芹菜素的糖苷化合物,其对 DPPH 自由基的清除能力应高于芹菜素。



新西兰牡荆苷 II 最高溶解浓度为 56.6 mmol/L

图 1 3 种黄酮物质对 DPPH 自由基的清除效果

Figure 1 Effects of three flavonoids on DPPH free radical scavenging

2.2 对 HepG2 细胞活力的影响

由图 2 可知,当样品浓度 > 10 μmol/L 时,芹菜素对 HepG2 细胞活力的抑制作用呈剂量依赖性。当芹菜素浓度为 80 μmol/L 时,HepG2 细胞活力为 61.5%。当样品浓度为 0~80 μmol/L 时,牡荆素和 新西兰牡荆苷 II 未表现出对细胞的毒性作用。

### 2.3 3种黄酮物质对HepG2细胞氧化还原平衡的调控作用

2.3.1 对HO-1、NQO1及Nrf2蛋白表达的影响 Nrf2为抗氧化反应中关键蛋白,当Nrf2被激活时,Nrf2与ARE结合,进而激活下游Ⅱ相解毒酶蛋白HO-1以及NQO1,从而发挥抗氧化作用<sup>[20]</sup>。

由图3可知,40,80 μmol/L的芹菜素对细胞内抗氧化蛋白的表达呈显著的抑制作用。40,80 μmol/L的牡荆素、新西兰牡荆苷Ⅱ处理组中,80 μmol/L下的效果优于40 μmol/L的,表明牡荆素和新西兰牡荆苷Ⅱ在80 μmol/L时具有抗氧化能力。这可能与高浓度芹菜素对HepG2细胞生长的抑制有关。

2.3.2 低浓度芹菜素对NQO1及Nrf2表达的影响 由图4可知,5 μmol/L芹菜素可上调细胞中的抗氧化蛋白,

其效果与阳性对照槲皮素(Que)相当。10,20 μmol/L的芹菜素在一定程度上抑制了抗氧化蛋白的表达。综上,低浓度(5 μmol/L)的芹菜素具有抗氧化活性。刘新粮<sup>[21]</sup>研究发现,低浓度芹菜素可诱导Nrf2介导的基因表达,与试验结果一致。

2.3.3 对Nrf2和NQO1蛋白表达的影响 由图5可知,牡荆素和新西兰牡荆苷Ⅱ未显著增加细胞中抗氧化蛋白Nrf2和NQO1的表达。相比之下,5 μmol/L的芹菜素处理后提高了蛋白Nrf2、NQO1的表达,但10 μmol/L芹菜素处理后抑制了抗氧化蛋白的表达。相较于其糖苷化合物,5 μmol/L的芹菜素具有一定的抗氧化能力,故后续研究低浓度(1.25,2.50,5.00 μmol/L)的芹菜素的抗氧化活性。

### 2.4 芹菜素对t-BHP诱导Ox-HepG2的保护作用

2.4.1 t-BHP诱导HepG2氧化损伤模型的建立 与正常

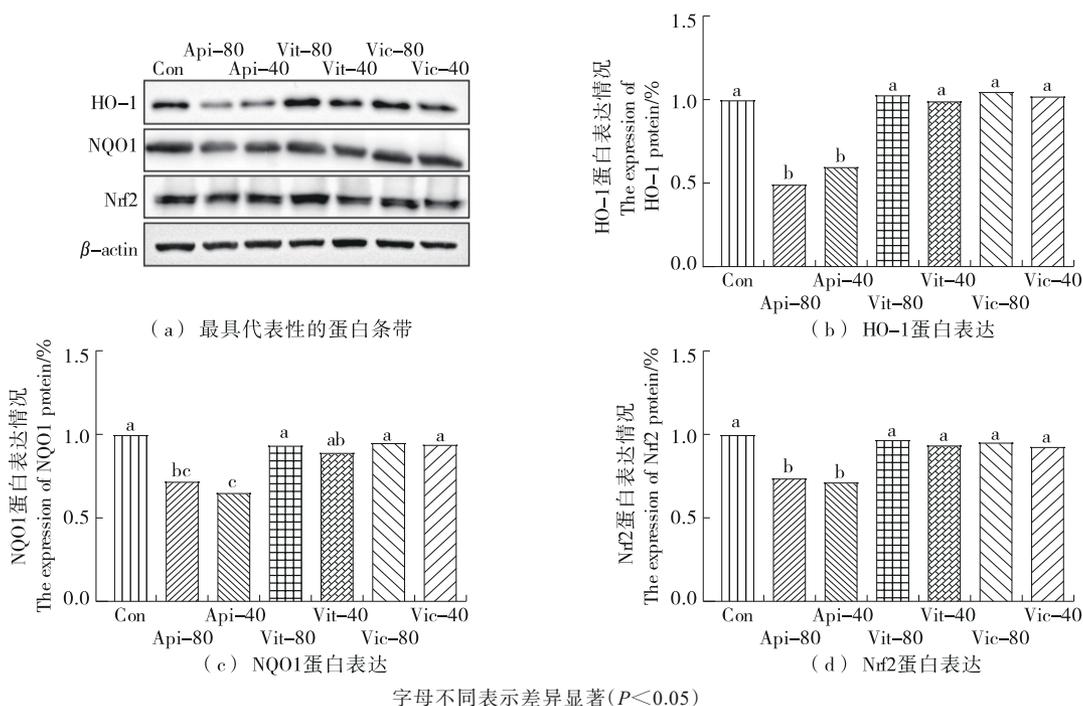


Figure 3 Effects of three flavonoids on the protein expression of HO-1, NQO1, and Nrf2

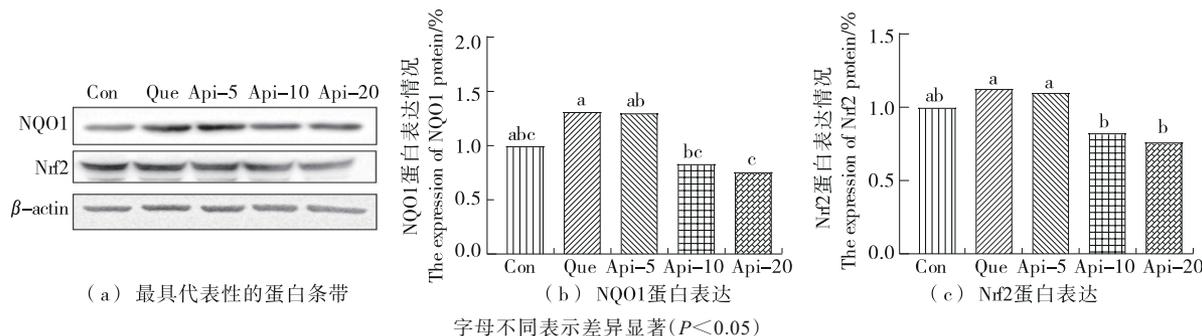
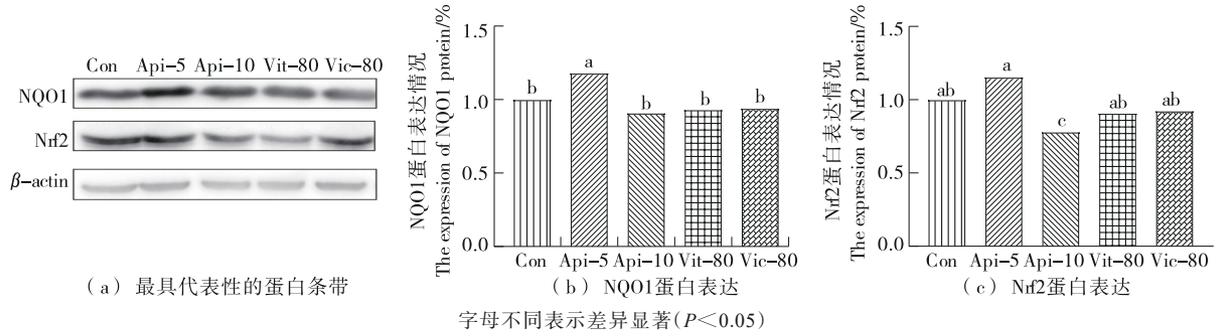


Figure 4 Effects of low-concentration apigenin on the protein expression of NQO1 and Nrf2



字母不同表示差异显著 ( $P < 0.05$ )

图 5 3 种黄酮物质对 Nrf2 和 NQO1 蛋白表达的影响

Figure 5 Effects of three flavonoids on the protein expression of Nrf2 and NQO1

HepG2 细胞内调控氧化还原平衡不同的是,氧化损伤细胞模型能更好地反映氧化损伤下生物体的抗氧化反应。叔丁基过氧化氢(t-BHP)是目前理想的氧化损伤诱导剂,可与细胞中的过渡金属反应产生自由基,自由基可以引发 ROS 的形成,从而诱导细胞中的氧化损伤。由图 6 可知,当 t-BHP 浓度为 500  $\mu\text{mol/L}$  时,细胞活力下降至 37.6%,表明 t-BHP 诱导的 HepG2 氧化损伤成功。经计算,IC<sub>50</sub> 值为 419.7  $\mu\text{mol/L}$ ,因此选择 400  $\mu\text{mol/L}$  的 t-BHP 建立 HepG2 细胞氧化损伤模型(Ox-HepG2)。

2.4.2 芹菜素对 Ox-HepG2 氧化应激状态的改善作用

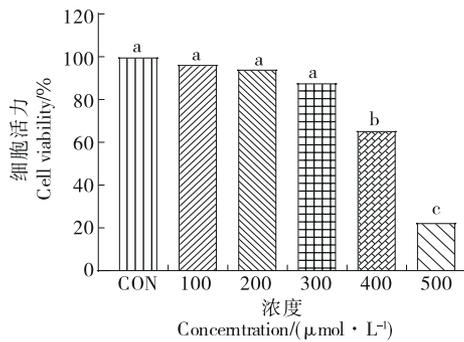
机体受到氧化损伤时,机体内的酶系统能够发挥抗

氧化应激的作用,如超氧化物歧化酶(SOD)将活性氧超氧阴离子转化为过氧化氢和氧气,过氧化氢酶(CAT)通过将过氧化氢分解为水和氧气,消除过氧化氢的活性从而保护细胞免受氧化损伤<sup>[22]</sup>。谷胱甘肽(GSH)是体内重要的三肽,可以保护细胞免受过氧化氢等活性氧物质的攻击<sup>[23]</sup>。由图 7 可知,与正常对照组相比,模型组的 CAT 和 SOD 活性均显著下降,表明 t-BHP 破坏了 HepG2 细胞氧化还原平衡状态。经不同浓度(1.25, 2.50, 5.00  $\mu\text{mol/L}$ )芹菜素处理后,3 种抗氧化酶活性均显著提升。表明芹菜素能够缓解由 t-BHP 引发的 HepG2 细胞中 CAT、GSH 以及 SOD 活力的下降,从而增强细胞的氧化还原能力。

2.4.3 芹菜素对 Ox-HepG2 细胞中 NQO1、HO-1 和 Nrf2 蛋白表达的影响 由图 8 可知,t-BHP 降低了 HepG2 细胞中 Nrf2、HO-1 以及 NQO1 的表达。经芹菜素处理后,抗氧化蛋白均显著上调,表示芹菜素缓解了由 t-BHP 引起的氧化损伤。

2.5 芹菜素诱导 Nrf2 核易位

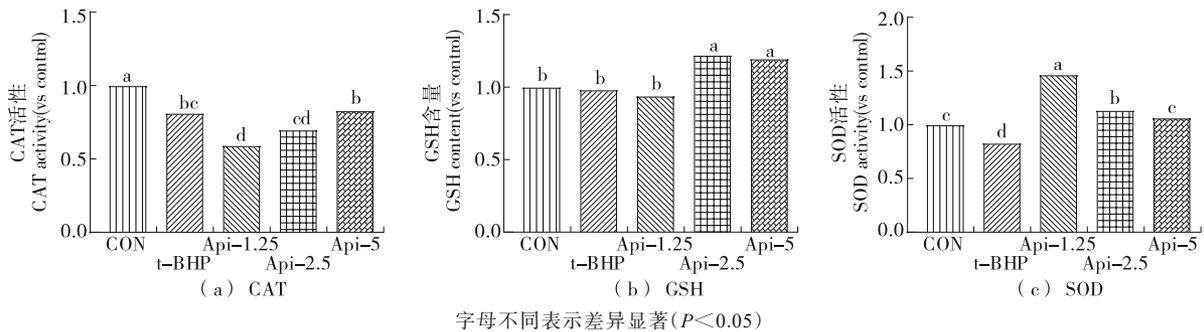
当细胞遭遇氧化应激时,Keap1 与 Nrf2 的结合能力降低,Nrf2 被激活释放,激活后的 Nrf2 会从细胞质易位至细胞核,与抗氧化反应元件(ARE)相结合,进而诱导下游靶标蛋白表达<sup>[20]</sup>。由图 9 可知,在 HepG2 细胞中,t-BHP 阻碍了 Nrf2 的核易位过程;芹菜素处理后,细胞内 Nrf2 的核积累量显著上升,表明芹菜素可诱导 Nrf2 发生核位移。



字母不同表示差异显著 ( $P < 0.05$ )

图 6 t-BHP 对 HepG2 细胞损伤作用

Figure 6 Effects of t-BHP on HepG2 cell injury



字母不同表示差异显著 ( $P < 0.05$ )

图 7 芹菜素对 Ox-HepG2 氧化应激状态的改善作用

Figure 7 Effects of apigenin on alleviating Ox-HepG2 oxidative stress

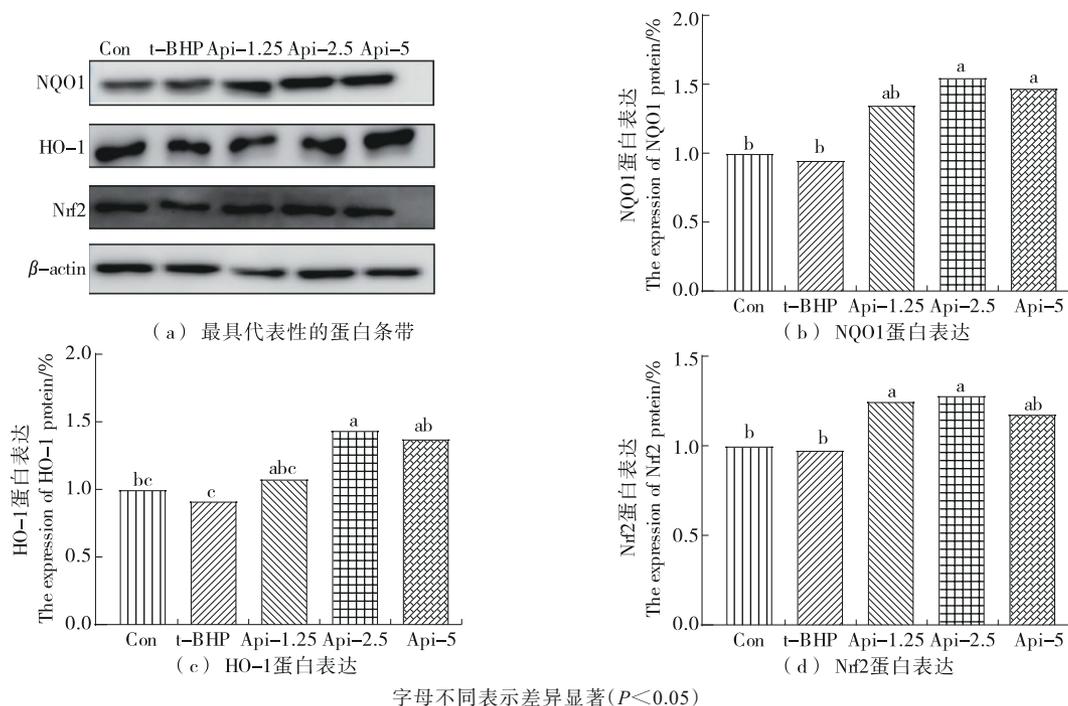


图8 芹菜素对Ox-HepG2细胞中抗氧化蛋白表达的影响

Figure 8 Effect of apigenin on the expression of antioxidant proteins in Ox-HepG2 cells

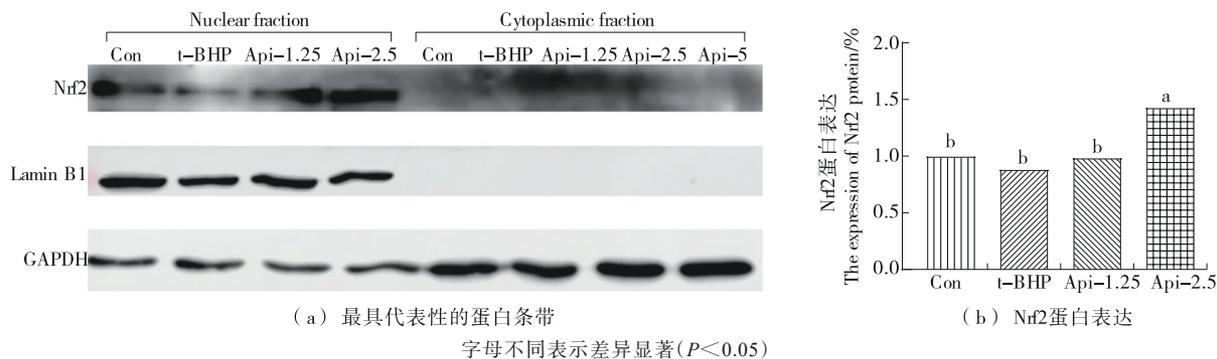


图9 芹菜素对Nrf2核易位的影响

Figure 9 Effects of apigenin on Nrf2 nuclear translocation

综上,芹菜素可能是通过诱导Nrf2发生核位移而激活Nrf2及其下游蛋白表达,从而发挥抗氧化作用。

### 3 结论

探究了铁皮石斛中典型黄酮物质芹菜素及其糖苷化合物牡荆素和新西兰牡荆苷II的抗氧化能力。结果表明,芹菜素的细胞水平抗氧化能力强于牡荆素和新西兰牡荆苷II,且芹菜素可通过诱导Nrf2核易位激活Nrf2信号通路从而表现出抗氧化活性。后续可进一步研究芹菜素对动物模型中肝脏的抗氧化酶系及其组织内Nrf2信号通路的影响,进而探讨其能否通过调控其他信号通路来治疗氧化应激损伤等。

### 参考文献

- [1] MA C J, GU C D, LIAN P P, et al. Sulforaphane alleviates psoriasis by enhancing antioxidant defense through KEAP1-NRF2 Pathway activation and attenuating inflammatory signaling[J]. Cell Death & Disease, 2023, 14(11): 768.
- [2] ZHANG P J, LI T, WU X Y, et al. Oxidative stress and diabetes: antioxidative strategies[J]. Frontiers of Medicine, 2020, 14(5): 583-600.
- [3] CHEN Q M. Nrf2 for cardiac protection: pharmacological options against oxidative stress[J]. Trends in Pharmacological Sciences, 2021, 42(9): 729-744.
- [4] GUAN T Z, LI N, XU X X, et al. Involvement of the Keap1-Nrf2-ARE pathway in the antioxidant activity of sinomenine[J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 2024, 753: 109928.

- [5] SHIRAIWA M, KITAKAZE T, YAMASHITA Y, et al. Pectolinarigenin induces antioxidant enzymes through Nrf2/ARE pathway in HepG2 cells[J]. *Antioxidants*, 2022, 11(4): 675.
- [6] LUO Z F, LIU L, NIE Q, et al. HPLC-based metabolomics of *Dendrobium officinale* revealing its antioxidant ability[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1060242.
- [7] 孙凤婷, 王旭, 韩新雨, 等. 复硝酚钠对铁皮石斛中黄酮含量和抗氧化活性的影响[J]. *浙江农业学报*, 2025, 37(4): 934-942.
- SUN F T, WANG X, HAN X Y, et al. Effect of sodium nitrophenate on flavonoid content and antioxidant activity in *Dendrobium officinale*[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2025, 37(4): 934-942.
- [8] WU F Q, ZHANG Y, LIU W J, et al. Comparison of torrefied and lyophilized *Dendrobium officinale* Caulis (Tiepishihu) by Fourier transform infrared spectroscopy and two-dimensional correlation spectroscopy[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2020, 1204: 127554.
- [9] 农彦彦, 吴子瑜, 林诗堃, 等. 高效液相色谱法测定铁皮石斛花中总黄酮的含量[J]. *顺德职业技术学院学报*, 2020, 18(1): 8-11.
- NONG Y Y, WU Z Y, LIN S K, et al. Determination of total flavones in *dendrobium officinale* flower by HPLC[J]. *Journal of Shunde Polytechnic*, 2020, 18(1): 8-11.
- [10] XU X Y, ZHANG C, WANG N, et al. Bioactivities and mechanism of actions of *Dendrobium officinale*: a comprehensive review[J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2022, 2022: 6293355.
- [11] 罗继娜, 许颖, 范钦, 等. 铁皮石斛粗多糖调控 NF- $\kappa$ B 信号通路抗肝纤维化作用及其超声评价[J/OL]. *中药药理与临床*. (2025-03-04) [2025-04-12]. <https://doi.org/10.13412/j.cnki.zyyl.20250303.007>.
- LUO J N, XU Y, FAN Q, et al. Effect of crude polysaccharide from *Dendrobium officinale* on NF- $\kappa$ B signaling pathway and its ultrasonic evaluation on liver fibrosis[J/OL]. *Pharmacology and Clinic of Chinese Medicine*. (2025-03-04) [2025-04-12]. <https://doi.org/10.13412/j.cnki.zyyl.20250303.007>.
- [12] 陈漪汶, 文霞, 黄健聪, 等. 铁皮石斛的抗氧化、保湿功效研究和应用现状[J]. *广州化工*, 2022, 50(13): 27-31.
- CHEN Y W, WEN X, HUANG J C, et al. Research progress on antioxidant and moisturizing effect of *dendrobium candidum*[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2022, 50(13): 27-31.
- [13] 梁芷韵, 谢镇山, 黄月纯, 等. 铁皮石斛黄酮苷类成分 HPLC 特征图谱优化及不同种源特征性分析[J]. *中国实验方剂学杂志*, 2019, 25(1): 22-28.
- LIANG Z Y, XIE Z S, HUANG Y C, et al. HPLC characteristic spectrum optimization of flavonoid glycosides on *Dendrobium officinale* and characteristics analysis of different provenances[J]. *Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae*, 2019, 25(1): 22-28.
- [14] 孙凤婷, 许振岚, 朱作艺, 等. 铁皮石斛的黄酮类成分测定及其生物可及性研究[J]. *浙江农业学报*, 2023, 35(11): 2 710-2 719.
- SUN F T, XU Z L, ZHU Z Y, et al. Determination of flavonoids in *Dendrobium officinale* kimura et migo and study on its bioavailability[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2023, 35(11): 2 710-2 719.
- [15] SI C, ZENG D Q, YU Z M, et al. Transcriptomic and metabolomic analyses reveal the main metabolites in *Dendrobium officinale* leaves during the harvesting period[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2022, 190: 24-34.
- [16] SONG J Y, WANG H R, SHENG J Y, et al. Vitexin attenuates chronic kidney disease by inhibiting renal tubular epithelial cell ferroptosis via NRF2 activation[J]. *Molecular Medicine*, 2023, 29(1): 147.
- [17] 罗颖懿, 李运容, 雷青熙, 等. 铁皮石斛共性黄酮类成分新西兰牡荆苷 II 的体外抗氧化与诱导 HepG2 细胞凋亡的作用[J]. *中国实验方剂学杂志*, 2019, 25(1): 43-50.
- LUO Y Y, LI Y R, LEI Z X, et al. Antioxidation activities in vitro of vicenin II isolated from *Dendrobium officinale* caulis and effect on HepG2 cells[J]. *Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae*, 2019, 25(1): 43-50.
- [18] ZHANG B X, WANG J, ZHAO G D, et al. Apigenin protects human melanocytes against oxidative damage by activation of the Nrf2 pathway[J]. *Cell Stress and Chaperones*, 2020, 25(2): 277-285.
- [19] KASHYAP P, SHIKHA D, THAKUR M, et al. Functionality of apigenin as a potent antioxidant with emphasis on bioavailability, metabolism, action mechanism and *in vitro* and *in vivo* studies: a review[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2022, 46(4): e13950.
- [20] YAO H, HE Q M, HUANG C, et al. Panaxatriol saponin ameliorates myocardial infarction-induced cardiac fibrosis by targeting Keap1/Nrf2 to regulate oxidative stress and inhibit cardiac-fibroblast activation and proliferation[J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2022, 190: 264-275.
- [21] 刘新粮. 芹菜素介导 AMPK/Nrf2/HO-1 信号通路在心肌缺血/再灌注损伤中的保护作用及机制研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022: 36-58.
- LIU X L. The protective effect and mechanism of apigenin in myocardial ischemia-reperfusion injury by regulating AMPK/Nrf2/HO-1 signaling pathway [D]. Nanchang: Nanchang University, 2022: 36-58.
- [22] TIE F F, DING J, HU N, et al. Kaempferol and kaempferide attenuate oleic acid-induced lipid accumulation and oxidative stress in HepG2 cells[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2021, 22(16): 8 847.
- [23] 周泓妍, 郑怡, 王海东, 等. 南、北五味子蛋白抗氧化活性和对 HepG2 细胞氧化应激损伤的修复作用[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(7): 51-60.
- ZHOU H Y, ZHENG Y, WANG H D, et al. Antioxidant activity of *Schisandra sphenanthera* and *Schisandra chinensis* protein on HepG2 cells[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, 50(7): 51-60.