

虎杖根不同溶剂提取物的抗氧化活性研究

秦小桐, 曹昱莹, 居瑞军, 林炎钧, 杜雨蒙, 彭效明, 管洁, 严晓强, 杨思敏*
(北京石油化工学院, 恩泽生物质精细化工北京市重点实验室, 北京 102617)

摘要:为探究虎杖根 6 种不同溶剂提取物的抗氧化活性, 利用 1, 1-二苯基-2-三硝基苯肼 (DPPH) 自由基清除法、2, 2'-二氮-双(3-乙基苯并噻唑-6-磺酸) 铵盐 (ABTS) 自由基清除法和总还原力检测法对 6 种不同溶剂虎杖根提取物进行抗氧化能力评价。选用抗氧化活性较强的 95% 乙醇提取物进行细胞层面内源性抗氧化能力的研究, 评价其对抗氧化基因 Nrf2、SOD、CAT、HO-1 的调控作用。结果表明, 相较于其他 5 种提取物, 95% 乙醇提取物的抗氧化能力最强且具有最高的多酚含量。95% 乙醇提取物可显著增加 Nrf2、SOD、CAT、HO-1 等抗氧化基因的表达。95% 虎杖根乙醇提取物具有较好的抗氧化活性, 具有开发成为天然抗氧化剂的潜力。

关键词:虎杖根; 提取物; 不同溶剂; 抗氧化活性; 内源性抗氧化

中图分类号: R284.2

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2024)04-0128-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.04.025

Study on antioxidant activity of polygonum cuspidatum root extracts by different solvents

QIN Xiao-tong, CAO Yu-ying, JU Rui-jun, LIN Yan-jun, DU Yu-meng, PENG Xiao-ming,
GUAN Jie, YAN Xiao-qiang, YANG Si-min*

(Beijing Key Laboratory of Enze Biomass Fine Chemicals, Beijing Institute of Petrochemical Technology,
Beijing 102617, China)

Abstract: The antioxidant ability of the extracts from polygonum cuspidatum root by six kinds of solvent respectively is evaluated by means of 1, 1-diphenyl-2-picrylhydrazyl radical scavenging method, 2, 2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) radical scavenging method and total reduction power assay. The 95%-ethanol extract with high antioxidant activity is selected for the study of endogenous antioxidant capacity at the cellular level, and its effect on the regulation of antioxidant genes such as Nrf2, SOD, CAT and HO-1 is evaluated. It is found that the 95%-ethanol extract shows the highest antioxidant capacity and contains the highest polyphenol content compared to the other five extracts. The 95%-ethanol extract can significantly increase the expression of antioxidant genes such as Nrf2, SOD, CAT and HO-1. In a sum, the 95%-ethanol extract of polygonum cuspidatum root has good antioxidant activity and shows the potential to be developed as a natural antioxidant.

Key words: polygonum cuspidatum root; extracts; different solvents; antioxidant activity; endogenous antioxidant

虎杖根 (*Polygonum cuspidatum* Sieb. et Zucc.) 别名酸筒杆、酸桶芦、大接骨、斑庄根, 是一种生长在亚洲和北美的传统中草药^[1], 具有祛风利湿、散瘀定痛、止咳化痰等功效, 常用于关节痹痛、湿热黄疸、经闭、症瘕、水火烫伤、跌扑损伤、痈肿疮毒、咳嗽痰多等的治疗^[2]。虎杖中含多种生物活性成分, 尤其富含蒽醌类、二苯乙烯类、黄酮类等^[3]。其中大黄素、大黄素甲醚等蒽醌类成分具有良好的抗炎^[4]、抗肿瘤^[5]等作用; 白藜芦醇、虎杖苷等酚类成分在抗

炎^[6-7]、抗病毒^[8]、抗氧化^[9-10]、抗肿瘤^[11-12]、神经保护^[13]等方面显示出良好的药理作用。

正常情况下, 机体内存在天然的抗氧化系统, 使自由基的产生和清除处于动态平衡中, 保护细胞结构和功能完整。Nrf2/ARE 信号通路是机体防御氧化应激的重要机制, 研究表明, 核转录相关因子-2 (Nuclear factor-erythroid 2-related factor 2, Nrf2) 受到应激后会进入细胞核, 识别并结合抗氧化反应元件 (ARE) 上的相应序列, 启动下游基因特别是抗氧化

收稿日期: 2023-07-10; 修回日期: 2024-02-04

基金项目: 北京市教委科技计划一般项目 (KM202210017011, KM201810017002); 国家级大学生创新创业计划项目 (2023J00045); 国家自然科学基金项目 (81703453); 北京石油化工学院校内学科平台建设项目 (2019XK006); 北京石油化工学院交叉科研探索项目 (BIPTCSF-019)

作者简介: 秦小桐 (1998-), 女, 硕士生, 研究方向为天然产物与活性分子研究, q17835203984@163.com; 杨思敏 (1989-), 女, 博士, 讲师, 研究方向为天然产物的药理活性与机制评价、Nrf2 与氧化应激及能量代谢等, yangsimin@bipt.edu.cn。

基因,进而提高细胞应对氧化应激的能力,产生细胞保护作用。Nrf2可作为维持细胞内氧化还原稳态的中枢调节者^[14],通过诱导血红素加氧酶-1(HO-1)、过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)等抗氧化酶的表达发挥抗氧化作用^[15]。

笔者采用1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)自由基清除、2,2-二氮-双(3-乙基苯并噻唑-6-磺酸)铵盐(ABTS)自由基清除和总还原力检测法对虎杖根95%乙醇、60%乙醇、正丁醇、水、乙酸乙酯和石油醚6个不同极性溶剂提取物的抗氧化活性进行研究并测定其总酚含量,进一步选用95%乙醇提取物对抗氧化相关基因Nrf2、SOD、CAT、HO-1的表达调控进行研究与分析。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

虎杖根药材,产地东北;1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH,批号M8GZJ-ET),梯希爱化成工业发展有限公司生产;2,2'-联氮双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)铵盐(ABTS,批号A0807A)、没食子酸标准品(批号A0530A)、福林酚(批号MO519C)、无水碳酸钠(批号S0914A),大连美仑生物技术有限公司生产;过硫酸钾(批号150318),北京偶合科技有限公司生产;L-抗坏血酸标准品(批号20130801),国药集团化学试剂有限公司生产;三氯化铁(批号C2209493)、铁氰化钾(批号H2217506)、三氯乙酸(批号J2209532)、二甲基亚砜(DMSO,批号D103277-500mL),阿拉丁生产;无水乙醇(分析纯,批号20210108)、乙酸乙酯(分析纯,批号20210401)、正丁醇(分析纯,批号20210218)、石油醚(分析纯,批号20190810),福晨(天津)化学试剂有限公司生产;甲醇(色谱纯,批号L510X29),北京百灵威科技有限公司生产;磷酸缓冲液(pH=7.4,批号03.15018C)、DMEM(High Glucose,批号03.1006C)、0.25%胰酶溶液(含EDTA,含酚红,批号03.13005A)、青链霉素混合液(100X,批号03.12001A)、特级胎牛血清(FBS,批号03.U16001DC),亿奥邦生物科技有限公司生产。

1.2 仪器与设备

酶标仪,美国伯腾仪器有限公司生产;SCIENTZ-50F型冷冻干燥机,宁波新芝生物技术股份有限公司生产;旋转蒸发仪,郑州长城科工贸有限公司生产;KQ-500E型超声波清洗器,昆山市超声仪器有

限公司生产;3K15型高速冷冻离心机,曦玛离心机(扬州)有限公司生产;多功能粉碎机,永康市红太阳机电有限公司生产;DK-98ⅡA型电热恒温水浴锅,天津市泰斯特仪器有限公司生产;CFX96型实时定量荧光PCR,伯乐生命医学产品有限公司生产。

1.3 实验方法

1.3.1 虎杖根提取物的制备

取适量虎杖根药材放入粉碎机中进行粉碎,将粉碎后的虎杖根粉末分别用体积分数为95%乙醇、60%乙醇、乙酸乙酯、石油醚、正丁醇、纯化水6种不同极性的溶液进行提取,料液比为1:10(g/mL),抽滤得到滤液,浓缩、冻干,得到不同极性溶剂的虎杖根提取物样品粉末并保存备用。

1.3.2 DPPH自由基清除能力测定

DPPH自由基清除的测定参考文献[16]中所述的方法并稍作修改。准确称取9.86 mg DPPH固体粉末于50 mL离心管中,加25 mL甲醇配置成浓度为1 mmol/L的DPPH储备液,避光保存备用(包上锡箔纸)。分别配制质量浓度为2、1、0.5、0.25、0.125 mg/mL提取物溶液进行检测,配制相同质量浓度的L-抗坏血酸(VC)水溶液作为阳性对照。在96孔板中分别加入50 μL的待测样品和150 μL的DPPH溶液混合均匀后室温避光放置30 min,分别以50 μL VC样品和150 μL的甲醇溶液作为阳性对照组及50 μL待测样品和150 μL的甲醇溶液作为样品对照组做相同处理,于517 nm处测定吸光值。用蒸馏水代替待测样作空白对照。其清除率的计算式为:

$$\text{清除率}(\%) = \{[A_0 - (A_i - A_j)]/A_0\} \times 100\% \quad (1)$$

式中: A_i 为样品组的吸光值; A_j 为样品对照组的吸光值; A_0 为空白组的吸光值。

1.3.3 ABTS自由基清除能力测定

ABTS自由基清除的测定参考文献[17]中所述的方法并稍作修改。准确称取12 mg ABTS溶于3.2 mL的纯化水中,避光备用;准确称取2 mg过硫酸钾溶液溶于3 mL的纯化水中,避光备用;各取500 μL进行混合,避光反应8 h后用PBS稀释35倍制得ABTS工作液,避光备用。提取物溶液和VC溶液配制方法同“DPPH自由基清除率的测定”中的配制方法。在96孔板中分别加入10 μL的待测样品和200 μL的ABTS溶液混合均匀,分别以10 μL VC样品和200 μL的PBS溶液作为阳性对照组及

10 μL 待测样品和 200 μL 的 PBS 溶液作为样品对照组做相同处理,于 734 nm 处测定吸光值。用蒸馏水代替待测样作为空白对照。其清除率的计算如式(1)所示。

1.3.4 总还原力清除测定

总还原力清除的测定参考文献[18]中所述方法并稍作修改。分别配置 1% 铁氰化钾溶液、10% 三氯乙酸溶液、0.2 mol/L 磷酸缓冲溶液、0.1% 三氯化铁溶液待用。提取物溶液和 VC 溶液配制方法同“DPPH 自由基清除率的测定”的配制方法。吸取样品提取液 1 mL 于 15 mL 离心管中,分别向各离心管中依次加入 0.2 mol/L 磷酸缓冲溶液 2.50 mL、1% 铁氰化钾溶液 2.50 mL,混合均匀后在 50 $^{\circ}\text{C}$ 水浴锅中恒温反应 20 min,取出冷却至室温;加入 10% 三氯乙酸溶液 2.50 mL,用离心机离心 5 min,转速为 5 000 r/min。取上清液 2.50 mL,依次加入无水乙醇 2.50 mL、0.1% 三氯化铁溶液 0.50 mL,混匀,于 700 nm 处测定吸光度。用蒸馏水代替待测样作为空白对照。

1.3.5 总酚含量的测定

总酚含量的测定参考文献[19]中所述的方法并稍作修改。以没食子酸作为标准品,精确称取 2 mg 没食子酸粉末于 10 mL 的容量瓶中,用蒸馏水定容至刻度得到标准储备液。准确吸取没食子酸标准储备液 0、20、40、60、100、200、300、400、500 μL 分别置于 1.5 mL 离心管中,用 60% 乙醇溶液配制成质量浓度为 0、4、8、12、20、40、60、80、100 mg/L 的标准溶液。分别移取上述质量浓度的没食子酸溶液 100 μL 于 1.5 mL 离心管中,加入福林酚试剂 250 μL ,摇匀;加入质量分数为 15% 的 Na_2CO_3 溶液 250 μL ,蒸馏水定容至刻度,摇匀。40 $^{\circ}\text{C}$ 水浴 60 min,静置冷却 20 min 后于 778 nm 处测定吸光度值。选用体积分数为 60% 的乙醇溶液作为溶剂,将待测样品提取物配制成合适浓度后,按上述步骤进行检测。没食子酸的质量浓度为横坐标、所测得吸光度值为纵坐标拟合标准曲线,其回归方程为 $y = 7.8552x - 0.0025$, $R^2 = 0.9993$ 。

1.3.6 细胞相对存活率的测定

细胞相对存活率的测定参考文献[20]中所述的方法并稍作修改。取处于对数生长期的 HaCat 细胞制成单细胞悬液,按 8×10^4 cells/mL 的密度接种于 96 孔板中,在 37 $^{\circ}\text{C}$ 、5% CO_2 环境下培养过夜后,用不同浓度的虎杖根和 95% 乙醇提取物溶液处理

24 h,同时设置对照组和空白组。每孔加 CCK-8 试剂 10 μL ,37 $^{\circ}\text{C}$ 下孵育 4 h,于波长 450 nm 处检测其吸光度。细胞相对存活率的计算式为:

$$\text{细胞相对存活率}(\%) =$$

$$[(A_{\text{给药组}} - A_{\text{空白组}})/(A_{\text{对照组}} - A_{\text{空白组}})] \times 100\% \quad (2)$$

1.3.7 细胞抗氧化基因检测

细胞抗氧化基因的测定参照文献[21]中所述的方法并稍作修改。取处于对数生长期的 HaCaT 细胞制成单细胞悬液,按 1×10^6 cells/mL 密度接种于 6 孔板,设置对照组、不同浓度虎杖根和 95% 乙醇提取物组。给药处理 12 h 后,利用 Trizol 法提取各组 HaCaT 细胞内总 RNA,并检测浓度和纯度,将得到的 RNA 根据反转录试剂盒进行反转录并以得到的 cDNA 为模板进行荧光定量 PCR 扩增反应。所用引物序列如表 1 所示。

表 1 引物序列

基因	Primer Fo(上游引物)	Primer Re(下游引物)
<i>GAPDH</i>	GGCATGGACTGTGGTCATGAG	TGCACCACCAACTGCCTAGC
<i>Nrf2</i>	TCAGCGACGGAAAGAGTA	TGGGCAACCTGGGAGTAG
<i>HO-1</i>	GCAGAGGTCATAGAAGAGG	AAGGAAGCCAGCCAAGAG
<i>SOD</i>	TACAACCTCAGCTCGCTCTTC	AAGACCCAAAGTCACGCTTG
<i>CAT</i>	CTGAAGGATCCTGACATGGT	GAAGGTGTGTGATCCATAGC

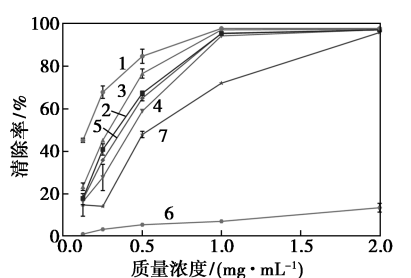
1.4 统计学分析

用 GraphPad Prism 9 分析实验数据并作图,结果用(平均数 \pm 标准差)表示。多组间比较采用单因素方差分析,干预前后比较采用配对检验, $P < 0.05$ 表示差异具有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 DPPH 自由基清除能力

1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)是一种稳定的自由基,在 517 nm 处具有显著的吸收峰。DPPH 自由基清除法由于其快速、简单且廉价而被广泛运用于抗氧化活性的评价^[22]。不同溶剂虎杖根提取物对 DPPH 自由基的清除能力如图 1 所示。由图 1 可知,不同溶剂提取物对 DPPH 自由基的清除能力均随着质量浓度的升高而逐渐增强,当质量浓度达到 2 mg/mL 时,95% 乙醇、正丁醇、乙酸乙酯、60% 乙醇、纯化水 5 种极性的提取物清除能力均接近 VC,但石油醚提取物则未见显著变化。6 种提取物对 DPPH 自由基的清除能力大小为:95% 乙醇 > 60% 乙醇 > 正丁醇 > 乙酸乙酯 > 纯化水 > 石油醚。

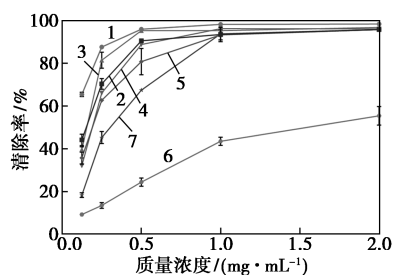


1—VC;2—正丁醇;3—95%乙醇;4—60%乙醇;
5—乙酸乙酯;6—石油醚;7—纯化水

图1 不同溶剂虎杖根提取物对 DPPH 自由基清除率的影响

2.2 ABTS 自由基清除能力

ABTS 作为一种具有稳定性的含氮自由基常用作体外总抗氧化活性的测定指标^[23],其在适当的氧化剂作用下会被氧化成绿色的 ABTS⁺,在 734 nm 处有吸收峰^[24]。不同溶剂虎杖根提取物对 ABTS 自由基的清除能力如图 2 所示。由图 2 可知,不同溶剂提取物对 ABTS 自由基的清除能力均随着质量浓度的升高而逐渐增强,当质量浓度达到 2 mg/mL 时,95%乙醇、正丁醇、乙酸乙酯、60%乙醇、纯化水 5 种极性的提取物清除能力均接近 VC,但石油醚提取物则未见显著变化。6 种提取物对 ABTS 自由基的清除能力大小为:95%乙醇>60%乙醇>正丁醇>乙酸乙酯>纯化水>石油醚。



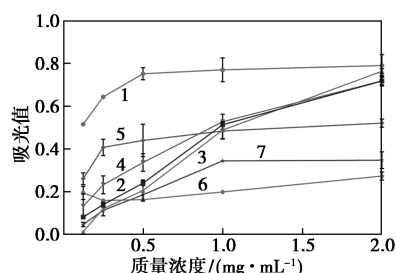
1—VC;2—正丁醇;3—95%乙醇;4—60%乙醇;
5—乙酸乙酯;6—石油醚;7—纯化水

图2 不同溶剂虎杖根提取物对 ABTS 自由基清除率的影响

2.3 总还原力清除能力

抗氧化剂的还原能力还体现在 Fe²⁺与 Fe³⁺这 2 种离子间的相互转换,其抗氧化性与还原能力之间成正比^[25]。不同溶剂虎杖根提取物总还原清除能力如图 3 所示。由图 3 可知,虎杖根不同溶剂提取物对总还原能力均随着浓度的升高而逐渐增强,当质量浓度达到 2 mg/mL 时,95%乙醇、正丁醇、60%乙醇 3 种极性的清除能力均接近 VC。6 种提取物

对总还原力的清除能力大小为:95%乙醇>60%乙醇>正丁醇>乙酸乙酯>纯化水>石油醚。



1—VC;2—正丁醇;3—95%乙醇;4—60%乙醇;
5—乙酸乙酯;6—石油醚;7—纯化水

图3 不同溶剂虎杖提取物对总还原力清除的影响

2.4 总酚含量测定

2.4.1 没食子酸标准曲线的绘制

没食子酸标准曲线如图 4 所示,标准曲线方程为: $y=7.8552x-0.0025$, $R^2=0.9993$ 。

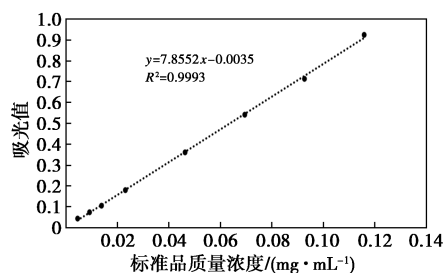


图4 没食子酸标准曲线的绘制

2.4.2 虎杖根提取物中的总酚质量分数

不同溶剂虎杖根提取物中总酚质量分数如表 2 所示。由表 2 可知,不同极性溶剂所提取的总酚质量分数有所不同,95%乙醇提取的总酚质量分数最高,为 2.08%,正丁醇溶液提取的总酚质量分数次之,为 1.71%,石油醚提取的总酚质量分数最少,仅为 0.65%。6 种溶剂所提取的总酚质量分数由高到低分别为:95%乙醇>正丁醇>60%乙醇>乙酸乙酯>纯化水>石油醚。95%乙醇提取物中总多酚质量分

表 2 不同溶剂虎杖根提取物中总酚含量

溶剂类型	总酚质量分数/%	SD 值
95%乙醇	2.08064	0.0075
60%乙醇	1.37892	0.1017
纯化水	0.82666	0.0177
正丁醇	1.70752	0.0805
乙酸乙酯	0.95704	0.0078
石油醚	0.64540	0.0044

数最高,表明虎杖根多酚类物质的提取中醇的提取效果相对较好。

2.5 虎杖根提取物对 HaCat 细胞相对存活率的影响

6 种不同溶剂的虎杖根提取物中 95%乙醇提取物的抗氧化活性较好,且提取物中总酚质量分数最高,因此,进一步对虎杖根 95%乙醇提取物进行内源性抗氧化活性研究。首先对虎杖根 95%乙醇提取物对 HaCat 细胞相对存活率进行评价,结果如表 3 所示。从表 3 中可以看出,虎杖根 95%乙醇提取物处理后对 HaCaT 细胞相对存活率与空白组相比并无显著差异,说明在 3.125~100 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 质量浓度范围内 95%乙醇提取物对 HaCaT 细胞相对存活率无明显影响,当质量浓度达到 150 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 时显示轻微毒性。

表 3 不同质量浓度 95%提取物对 HaCat 细胞存活率的影响

提取物质量浓度/ $(\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1})$	细胞相对存活率/%	SD 值
0	100	0.014961218
3.125	92.95	0.016787040
6.25	91.43	0.013032705
12.5	91.47	0.020586160
25	93.65	0.010287249
50	96.12	0.060068072
100	92.53	0.122934600
150	76.78	0.005676169

2.6 虎杖根 95%乙醇提取物对 HaCat 细胞中抗氧化基因的影响

虎杖根 95%乙醇提取物对 HaCat 细胞抗氧化基因的调控结果如表 4 所示。由表 4 可知,该提取物可显著上调抗氧化基因 Nrf2、SOD、CAT、HO-1 的表达。虎杖根 95%乙醇提取物在质量浓度为 10 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 和 25 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 时,对 Nrf2 因子的表达有显

表 4 不同浓度 95%提取物对 HaCat 细胞中抗氧化基因表达的影响

基因类型	提取物质量浓度/ $(\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1})$	相对表达量	SD 值
Nrf2	0	1.00	0.02688
	5	0.94	0.08477
	10	1.39	0.14431
	25	1.29	0.07497
	50	0.95	0.08796
	75	1.06	0.08088

HO-1	0	1.00	0.05369
	5	0.92	0.13283
	10	1.18	0.12976
	25	1.34	0.08451
	50	1.52	0.29331
	75	2.25	0.32900
SOD	0	1.00	0.12435
	5	1.20	0.12336
	10	1.26	0.05553
	25	1.33	0.10966
	50	1.21	0.19949
	75	1.42	0.03329
CAT	0	1.00	0.12561
	5	1.36	0.05089
	10	1.67	0.03680
	25	2.28	0.08564
	50	1.73	0.02744
	75	2.41	0.18917

著影响 ($P < 0.01$); 虎杖根 95%乙醇提取物在质量浓度为 75 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 时,虎杖根 95%乙醇提取物显著上调 HO-1、SOD、CAT 基因的表达 ($P < 0.01$)。

3 结论与讨论

当机体受到氧化刺激时会产生大量活性氧自由基,这些自由基会引起细胞氧化损伤,最终造成细胞结构和功能的改变甚至死亡。过量的自由基长期存在会导致机体衰老甚至引发疾病。抗氧化剂对于清除机体内过量的自由基维持机体氧化还原平衡具有重要意义。天然抗氧化物是重要的抗氧化剂来源,目前已得到广泛的认可。

虎杖根的 6 种不同溶剂提取物均具有一定的抗氧化活性,其中 95%乙醇提取物显示出良好的 DPPH 和 ABTS 自由基清除活性,同时具有较好的总还原能力。水提取物和石油醚提取物显示出低抗氧化活性。95%乙醇提取物的总酚质量分数高于其他极性的提取物,同时 95%乙醇提取物的抗氧化活性相对较好。因此,推测总酚类物质是虎杖根提取物产生抗氧化活性的主要原因之一。

虎杖 95%乙醇提取物能显著增加 Nrf2 基因的表达,对 HO-1、SOD 和 CAT 这 3 种抗氧化酶具有显著的上调作用,表明该提取物的抗氧化性是通过激活 Nrf2 信号通路,进而上调 HO-1、SOD、CAT 抗氧

化酶的活性,这是由于其中含有白藜芦醇、虎杖苷等酚类物质有关。

综上所述,虎杖不同溶剂提取物均具有良好的抗氧化活性,其作用机制与激活 Nrf2 信号通路和上调 HO-1、SOD、CAT 3 种抗氧化酶的表达有关。

参考文献

- [1] Ke J, Li M T, Xu S, *et al.* Advances for pharmacological activities of polygonum cuspidatum—A review [J]. *Pharmaceutical Biology*, 2023, 61(1):177-188.
- [2] 周罡.猴年话“猴药”[J].开卷有益:求医问药,2016(8):1.
- [3] Yu M, Chen T T, Zhang T, *et al.* Anti-inflammatory constituents in the root and rhizome of Polygonum cuspidatum by UPLC-PDA-QTOF/MS and lipopolysaccharide-activated RAW264.7 macrophages [J]. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2021, 20(195):113839.
- [4] 柳玲,王庆林.大黄素、茶多酚和鱼腥草素钠对大鼠结肠炎的治疗作用[J].*华西药理学杂志*,2019,34(1):47-51.
- [5] 樊君,乔迪,陈广.大黄素对 LPS 诱导的心肌细胞炎症反应和细胞凋亡的影响及机制[J].*中成药*,2021,43(3):630-635.
- [6] 卢晶,苑萌,冯学辉,等.白藜芦醇调控 ROS/NLRP3/Caspase1 通路介导的细胞焦亡对重症肺炎大鼠肺损伤的保护作用[J].*分子诊断与治疗杂志*,2023,15(5):888-891,896.
- [7] Li R, Li J, Huang Y, *et al.* Polydatin attenuates diet-induced non-alcoholic steatohepatitis and fibrosis in mice [J]. *International Journal of Biological Sciences*, 2018, 14(11):1411-1425.
- [8] 刘伟,银慧慧,赵武,等.桃金娘 4 种酚类成分体外抗猪流行性腹泻病毒活性研究[J].*现代畜牧兽医*,2020,(6):11-13.
- [9] Yadav A, Sunkaria A, Singhal N, *et al.* Resveratrol loaded solid lipid nanoparticles attenuate mitochondrial oxidative stress in vascular dementia by activating Nrf2/HO-1 pathway [J]. *Neurochemistry International*, 2018, 112:239-254.
- [10] Pang N, Chen T, Deng X, *et al.* Polydatin prevents methylglyoxal-induced apoptosis through reducing oxidative stress and improving mitochondrial function in human umbilical vein endothelial cells [J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2017, 1:7180943.
- [11] De Gregorio A, Krasnowska E K, Zonfrillo M, *et al.* Influence of polydatin on the tumor microenvironment in vitro; Studies with a colon cancer cell model [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(15):8442.
- [12] 李伟宏,王风云.白藜芦醇 mPEG-PLGA 纳米粒的制备及其体内药动学、抗肿瘤活性研究 [J]. *中成药*, 2022, 44(11):3409-3415.
- [13] Chen J, Liu Q, Wang Y, *et al.* Protective effects of resveratrol liposomes on mitochondria in substantia nigra cells of parkinsonized rats [J]. *Annals of Palliative Medicine*, 2021, 10(3):2458-2468.
- [14] 张琳琳,贾维,郑翠侠.中药调节 Nrf2 在肿瘤防治中的研究 [J]. *吉林中医药*, 2020, 40(11):1533-1536.
- [15] Anwar A A, Li F Y, Leake D S, *et al.* Induction of heme oxygenase 1 by moderately oxidized low-density lipoproteins in human vascular smooth muscle cells; Role of mitogen-activated protein kinases and Nrf2 [J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2005, 39(2):227-236.
- [16] 王惠,陈康,郝雯雯,等.蝉花抑菌抗氧化谱效关系的初步研究 [J]. *食品与生物技术学报*, 2022, 41(5):56-65.
- [17] 李晓强,胡坤,龚玉石,等.不同产地、不同提取方法对余甘子多酚含量及抗氧化活性的影响 [J]. *食品工业科技*, 2023, 44(2):317-323.
- [18] 张丽明,汪楠,马雅鸽,等.宾川葡萄籽原花青素的抗氧化活性研究及饮料制备 [J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(21):115-122.
- [19] 刘晓秋,王春燕,黄博.植物多酚类物质的检测研究 [J]. *山东化工*, 2018, 47(16):90-92,95.
- [20] 刘海倩,梁雁翔,鲁东昊,等.川续断皂苷 VI 对 H₂O₂ 诱导 HaCaT 细胞损伤的保护作用 [J]. *广东化工*, 2022, 49(24):46-48.
- [21] 王琪,倪清蓉,姜兆婷,等.抗氧化因子 Nrf2 对 H₂O₂ 诱导的人黑素细胞氧化应激水平和抗氧化基因表达的影响 [J]. *中国皮肤性病学杂志*, 2022, 36(7):744-750.
- [22] Kedare S B, Singh R P. Genesis and development of DPPH method of antioxidant assay [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2011, 48(4):412-422.
- [23] Arab K, Ghanbarzadeh B, Ayaseh A, *et al.* Extraction, purification, physicochemical properties and antioxidant activity of a new polysaccharide from Ocimum album L. seed [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 180:643-653.
- [24] 韦华珊,刘凌雯,孔晶,等.天然低共熔溶剂超声辅助提取羊栖菜多糖工艺优化及其抗氧化性能的研究 [J]. *现代食品*, 2022, 28(13):144-148,152.
- [25] Zhu Q Y, Hackman R M, Ensuna J L, *et al.* Antioxidative activities of oolong tea [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50(23):6929-6934. ■