

基于熵权法和灰色关联度结合成分分析优选人参提取物抗氧化活性最佳极性部位

徐志佳, 李胜楠, 周文文, 肖凤琴, 刘 晖, 杨亦柳, 李光哲, 严铭铭

Optimization of the Best Polar Site for Antioxidant Activity of *Panax ginseng* Extract Based on Entropy Weight Method and Grey Relational Analysis Combined with Component Analysis

XU Zhijia, LI Shengnan, ZHOU Wenwen, XIAO Fengqin, LIU Hui, YANG Yiliu, LI Guangzhe, and YAN Mingming

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023030241>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于熵权法和灰色关联度法的鲜食糯玉米品质评价

Quality Evaluation of Different Varieties of Fresh-edible Waxy Corns Based on Entropy Weight Method and Grey Interconnect Degree Analysis

食品工业科技. 2021, 42(14): 241-248 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020090072>

山银花不同萃取部位抗炎、抗氧化体外活性评价及化学成分分析

Evaluation of *in Vitro* Anti-inflammatory and Antioxidant Activities and Analysis of Chemical Components in Different Extraction Parts of Lonicerae Flos

食品工业科技. 2021, 42(8): 81-87 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020080208>

方格星虫提取物的抗氧化活性及成分分析

Antioxidation activity and composition analysis of Sipunculus nudus extracts

食品工业科技. 2017(21): 7-11 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.21.002>

枸杞芽茶与叶茶的化学成分和抗氧化活性分析

Analysis of chemical compositions and antioxidant activities of Lycium barbarum bud and leaf teas

食品工业科技. 2017(10): 129-134 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.10.017>

黔产草果不同部位精油化学成分分析及体外抗氧化活性评价

Chemical Component Analysis and *in Vitro* Antioxidant Activity Evaluation of Essential Oils from Different Parts of *Amomum tsaoko* in Guizhou Province

食品工业科技. 2020, 41(14): 52-57,64 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.14.009>

白肉灵芝化学成分及体外抗氧化活性分析

Chemical Constituents and Antioxidant Activities *in Vitro* of *Ganoderma leucocontextum*

食品工业科技. 2021, 42(9): 340-346 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020070241>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

徐志佳, 李胜楠, 周文文, 等. 基于熵权法和灰色关联度结合成分分析优选人参提取物抗氧化活性最佳极性部位 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(4): 211–220. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030241

XU Zhijia, LI Shengnan, ZHOU Wenwen, et al. Optimization of the Best Polar Site for Antioxidant Activity of *Panax ginseng* Extract Based on Entropy Weight Method and Grey Relational Analysis Combined with Component Analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(4): 211–220. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030241

· 分析检测 ·

基于熵权法和灰色关联度结合成分分析优选人参提取物抗氧化活性最佳极性部位

徐志佳¹, 李胜楠¹, 周文文¹, 肖凤琴¹, 刘 晖¹, 杨亦柳¹, 李光哲^{1,*}, 严铭铭^{1,2,*}

(1. 长春中医药大学, 吉林长春 130117;

2. 吉林省中药保健食品科技创新中心, 吉林长春 130117)

摘 要:目的: 考察人参不同极性部位抗氧化活性差异, 筛选最佳活性部位。方法: 本研究以石油醚、氯仿、乙酸乙酯、正丁醇依次萃取人参水提物。通过高效液相色谱 (High Performance Liquid Chromatography, HPLC)、紫外分光光度计测定人参不同极性部位总酚酸、总皂苷、总多糖、总黄酮、人参皂苷 Rg1、人参皂苷 Re、人参皂苷 Rb1 含量; 以 DPPH 自由基、ABTS⁺自由基、羟基自由基、超氧阴离子自由基及细胞氧化损伤模型测定不同极性部位体外抗氧化活性; 结合熵权法与灰色关联度分析, 建立人参不同极性部位的质量评价模型。对人参不同极性部位的 12 个质量特性指标赋权, 最终优选出人参抗氧化最佳极性部位。结果: 人参不同极性部位成分含量及抗氧化活性差异明显。其中, 正丁醇部位的总酚酸、总黄酮、人参皂苷 Rb1 含量高于其他部位。正丁醇部位抗氧化活性最强, 对 DPPH 自由基、ABTS⁺自由基、羟基自由基、超氧阴离子自由基具有一定的清除能力, 相应的 IC₅₀ 值分别为 0.14、0.57、0.92、0.75 mg/mL。另外, 结合质量评价模型得到人参不同极性部位的相对关联度值的范围为 0.352–0.618, 正丁醇部位测得相对关联度最高 (0.618), 进一步表明正丁醇部位抗氧化活性最强。结论: 综合熵权法和灰色关联度分析的评价结果, 初步优选出正丁醇部位为人参抗氧化最理想部位, 为人参作为天然抗氧化剂的研究及人参抗氧化食品的开发应用提供理论基础。

关键词: 人参, 不同极性部位, 化学成分, 抗氧化活性, 熵权法, 灰色关联分析

中图分类号: TS255.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)04-0211-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023030241

本文网刊:



Optimization of the Best Polar Site for Antioxidant Activity of *Panax ginseng* Extract Based on Entropy Weight Method and Grey Relational Analysis Combined with Component Analysis

XU Zhijia¹, LI Shengnan¹, ZHOU Wenwen¹, XIAO Fengqin¹, LIU Hui¹, YANG Yiliu¹,
LI Guangzhe^{1,*}, YAN Mingming^{1,2,*}

(1. Changchun University of Traditional Chinese Medicine, Changchun 130117, China;

2. Science and Technology Innovation Center of TCM Health Food of Jilin Province, Changchun 130117, China)

Abstract: Objective: The differences in antioxidant activity of different polar parts of panax ginseng were investigated to screen the best active parts. Method: In this study, the water extract of *Panax ginseng* was extracted by petroleum ether, chloroform, ethyl acetate and n-butanol in turn. The contents of total phenolic acids, total saponins, total polysaccharides, total flavonoids, ginsenoside Rg1, ginsenoside Re and ginsenoside Rb1 in different polar parts were determined by high

收稿日期: 2023-03-24

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YEC1702100); 吉林省科技发展计划项目 (20210401096YY); 长春市科技发展计划项目 (21ZGY20); 2022 年国家级大学生创新创业训练计划项目 (202210199043)。

作者简介: 徐志佳 (2000–), 女, 硕士研究生, 研究方向: 天然药物化学及新药开发研究, E-mail: xzjxxnlkqy@163.com。

* 通信作者: 李光哲 (1972–), 男, 博士, 教授, 研究方向: 药物化学、中药化学及保健食品开发研究, E-mail: ligz@nenu.edu.cn。

严铭铭 (1968–), 女, 博士, 教授, 研究方向: 药物化学、中药化学及新药开发研究, E-mail: yannmm595@yahoo.com.cn。

performance liquid chromatography (HPLC) and ultraviolet-visible (UV) spectrophotometer. The *in vitro* antioxidant activity of different polar parts was determined by DPPH free radical, ABTS⁺ free radical, hydroxyl radical, superoxide anion free radical and cell oxidative damage model. Combined with entropy weight method and grey relational analysis, the quality evaluation model of different polar parts of *Panax ginseng* was established. By weighting twelve quality characteristic indexes of different polar parts of *Panax ginseng*, the best antioxidant polar part of *Panax ginseng* was ultimately selected. Results: The differences in the components and antioxidant activity of different polar parts of *Panax ginseng* were obvious. Among them, the content of total phenolic acid, total flavonoids and ginsenoside Rb1 in n-butanol part was higher than that in other parts. The n-butanol part had the best antioxidant activity, and had certain scavenging ability to DPPH free radical, ABTS⁺ free radical, hydroxyl radical and superoxide anion free radical, and the corresponding IC₅₀ values were 0.14, 0.57, 0.92 and 0.75 mg/mL, respectively. In addition, combined with the quality evaluation model, the relative correlation degrees of range of different polar parts of *Panax ginseng* was 0.352~0.618, and the relative correlation degree of n-butanol part was the highest (0.618), which further indicated that the antioxidant activity of n-butanol part was the strongest. Conclusion: Based on the evaluation results of entropy weight method and grey correlation analysis, the n-butanol part was preliminarily selected as the most ideal antioxidant part of *Panax ginseng*, which would provide a theoretical basis for the research of *Panax ginseng* as a natural antioxidant and the development and application of *Panax ginseng* antioxidant food.

Key words: *Panax ginseng*; different polarity extracts; chemical composition; antioxidant activity; entropy method; grey relational analysis

人参(*Panax ginseng* C. A. Meyer)是五加科、人参属植物,具有大补元气,复脉固脱,补脾益肺,生津养血,安神益智之功效^[1]。现代研究表明人参有多种药理作用,包括调节血压、促进和调节免疫功能、调节脂类物质代谢、抗氧化、延缓衰老等^[2]。人参营养丰富,富含多种活性物质,其中包括人参皂苷 Rb1、Re、Rd、Rg1 等多种皂苷、多糖类等有效成分^[3]。

近年来研究发现人参是一种天然抗氧化剂的优良来源^[4],Yu 等^[5]发现人参皂苷 Re 可通过减轻氧化应激抑制大鼠心肌损伤,改善心功能不全。人参皂苷 Rg1、Rb1、Re 可通过调节红细胞核因子相关因子 2(nuclear factor-erythroid 2-related factor 2, Nrf2)、血红素氧合酶 1(hemeoxygenase-1, HO-1)蛋白表达、JNK 通路来抑制氧化应激作用^[6-7]。赵雨初等^[8]通过研究人参总皂苷对 H₂O₂ 诱导的红细胞氧化应激作用机制发现人参总皂苷能够帮助恢复细胞内氧化平衡,抑制 H₂O₂ 诱导的红细胞氧化应激。此外,人参具有药食两用的特点^[9-10],有研究报道以人参多糖和人参提取物为主要原料的功能性食品具有抗氧化、抗衰老、保护皮肤等效果^[11-12]。

因此,本研究利用液-液萃取法将人参水提取物分为石油醚部位(R1)、氯仿部位(R2)、乙酸乙酯部位(R3)、正丁醇部位(R4)、水部位(R),应用灰色关联分析^[13]结合熵权法^[14]对人参不同极性部位的 7 种组分含量、5 个体外抗氧化活性质量特性指标赋权并建立相关性分析,科学优选人参抗氧化最佳极性部位并评价活性与成分间的关系,以期从人参提取物中初步筛选天然抗氧化剂部位,为开发研究人参功能性食品提供原料及理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

人参药材 购自于长春中医药大学附属医院,

批号:20220815;石油醚、三氯甲烷、乙酸乙酯、正丁醇、过硫酸钾、三氯乙酸 分析纯,北京化工厂;人参皂苷 Rg1(批号:C27N11Q132589)、人参皂苷 Re(批号:J25GB152733)、人参皂苷 Rb1(批号:G01O11Y126429) 标准品,均购于上海源叶生物科技有限公司;没食子酸(批号:110831-200302)、芦丁(批号:100080-200707) 标准品,均购于中国药品生物制剂所;DPPH、ABTS 购于上海麦克林生化科技有限公司;DME/F-12 1:1(1X)培养基、FBS(胎牛血清)、P/S(青链霉素双抗溶液)、0.25% 胰蛋白酶溶液、二甲基亚砜、1×PBS(磷酸盐缓冲液) 均购于美国 Gibco 公司;人神经母细胞瘤细胞(SH-SY5Y) 购于武汉普诺赛生命科技有限公司。

AB265-S 十万分之一分析天平 瑞士 METTLER TOLEDO 公司;CP223C 电子天平 美国奥豪斯仪器有限公司;KQ-250B 型超声波清洗器 昆山市超声仪器有限公司;HH-6 数显恒温水浴锅 金坛市佳美仪器有限公司;DZF-6053 真空干燥箱 上海一恒科学仪器有限公司;DZTW 电子调温电热套 北京市光明医疗仪器有限公司;UV-1700 紫外分光光度计 日本 SHIMADZU 公司;Infinite M200PRO 型全自动酶标仪 瑞士 Tecan 公司;3131 型细胞培养箱 CO₂ 培养箱 美国 Thermo 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 人参提取物不同极性部位获取 将干燥人参样品破碎过筛(20 目),称量人参 50 g,置于圆底烧瓶内,加入 10 倍量蒸馏水,加热回流提取 2 h,过滤,再向滤渣中加入 10 倍量蒸馏水,回流提取 2 h,过滤。合并两次提取液,将提取液浓缩至 50 mL。依次使用石油醚、三氯甲烷、乙酸乙酯、正丁醇以萃取溶剂与浓缩液体积比为 1:1 进行萃取,萃取 3 次,合并同部位萃取液,回收溶剂,干燥,即得。

$$\text{出膏率}(\%) = \frac{\text{干燥后膏状物质量}}{\text{原药材质量}} \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

1.2.2 人参提取物不同极性部位抗氧化活性研究

1.2.2.1 人参提取物不同极性部位对超氧阴离子清除能力 采用邻苯三酚自氧化法^[15]。Tris-HCl (50 mmol/L pH=8.2) 和邻苯三酚溶液(浓度为 6 mmol/L)于 25 ℃ 预热 20 min。在 96 孔板中加入 150 μL Tris-HCl、30 μL 样品溶液、30 μL 预热过的邻苯三酚, 25 ℃ 保温 4 min, 加 20 μL 浓盐酸, 于 420 nm 处测定吸光度值 A_1 。以蒸馏水替代样品溶液所测得吸光度值作为 A_0 。以蒸馏水代替邻苯三酚作为空白对照组 A_2 。按下式计算超氧阴离子的清除率。

$$\text{超氧阴离子自由基清除率}(\%) = \frac{[A_0 - (A_1 - A_2)]}{A_0} \times 100 \quad \text{式 (2)}$$

1.2.2.2 人参提取物不同极性部位对羟基自由基清除能力 采用水杨酸法测定对羟基自由基的作用^[16], 取 96 孔板, 每孔分别加入 50 μL 样品、50 μL 硫酸亚铁溶液(6 mmol/L)、50 μL 过氧化氢(6 mmol/L), 于 37 ℃ 恒温加热 10 min 后加入 50 μL 水杨酸(6 mmol/L), 于 37 ℃ 恒温加热 30 min 后在 510 nm 处测定吸光度值 A_1 。以蒸馏水代替样品液, 测定吸光度值 A_0 ; 以 1 mL 蒸馏水代替过氧化氢溶液, 测定吸光度值 A_2 。按下式计算羟基自由基清除率。

$$\text{羟基自由基清除率}(\%) = \frac{[A_0 - (A_1 - A_2)]}{A_0} \times 100 \quad \text{式 (3)}$$

1.2.2.3 人参提取物不同极性部位对 DPPH 自由基清除能力 参照乐婷等^[17]的实验方法, 略有改动。在 96 孔板中, 每孔加入 100 μL 样品水溶液, 100 μL DPPH 溶液, 于暗室反应 30 min, 在 517 nm 处测定吸光度值 A_1 ; 以甲醇代替 DPPH 溶液作为样品对照组, 测定吸光度值 A_2 ; 以蒸馏水代替样品液作为空白对照组, 测定吸光度值 A_0 。按下式计算 DPPH 自由基的清除率。

$$\text{DPPH 自由基清除率}(\%) = \frac{[A_0 - (A_1 - A_2)]}{A_0} \times 100 \quad \text{式 (4)}$$

1.2.2.4 人参提取物不同极性部位对 ABTS⁺自由基清除能力 ABTS⁺自由基清除率测定: 参照文培华等^[18]的实验方法, 有所改动。ABTS⁺自由基清除能力由下式计算。

$$\text{ABTS}^+ \text{ 自由基清除率}(\%) = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100 \quad \text{式 (5)}$$

A_1 : 样品+ABTS⁺溶液吸光度值, A_0 : PBS 溶液+

ABTS⁺溶液吸光度值。

1.2.2.5 人参提取物不同极性部位对 H₂O₂ 诱导的 SH-SY5Y 细胞氧化损伤的保护能力 参考于婧文等^[19]方法, 略有改动。采用 DME/F-12 1:1 培养基 (10% FBS, 1% P/S) 培养 SH-SY5Y 细胞, 并取对数生长期的 SH-SY5Y 细胞以 5×10^3 个/孔均匀接种于 96 孔板中, 待细胞贴壁 70%~80% 后, 弃去培养液, 用人参不同极性部位对细胞预保护 6 h, 再与 250 μmol/mL H₂O₂ 共同作用于 SH-SY5Y 细胞株 24 h 后, 在显微镜下观察细胞形态并采用 CCK-8 法检测细胞活力, 观察人参不同极性部位对 H₂O₂ 损伤 SH-SY5Y 细胞的保护作用。其中, 空白组为细胞+培养基; 模型组为细胞+培养基+H₂O₂ 溶液; 给药组为细胞+培养基+样品+H₂O₂ 溶液。

$$\text{细胞存活率}(\%) = \frac{[(OD_s - OD_b)]}{(OD_c - OD_b)} \times 100 \quad \text{式 (6)}$$

式中, OD_s : 细胞+培养基+CCK-8+样品或 H₂O₂ 溶液吸光度值; OD_c : 细胞+培养基+CCK-8; OD_b : 培养基+CCK-8+样品或 H₂O₂ 溶液吸光度值。

1.2.3 人参提取物不同极性部位活性成分测定

1.2.3.1 人参皂苷 Re、Rb1、Rg1 测定 对照品溶液制备: 参考 2020 年版《中国药典》一部人参项下含量测定的方法^[20], 精密称取人参皂苷 Re、Rb1、Rg1 对照品, 加甲醇制成浓度(C_s)为每 1 mL 含 0.2 mg 对照品的混合溶液。

供试品溶液制备: 精密称取人参提取物 1 g(W), 放入具塞锥形瓶中, 精密量取 50 mL(V) 色谱甲醇加入锥形瓶中, 超声处理 30 min 后, 补重, 用 0.22 μm 微孔膜过滤, 既得供试品溶液。

液相色谱条件: 以十八烷基硅烷键合硅胶为填充剂, 以乙腈为流动相 A, 水为流动相 B 进行梯度洗脱, 检测波长为 203 nm; 0~35 min: 流动相 A: 19%, 流动相 B: 81%; 35~55 min: 流动相 A: 19%~29%, 流动相 B: 81%~71%; 55~70 min: 流动相 A: 29%, 流动相 B: 71%; 70~100 min: 流动相 A: 29%~40%, 流动相 B: 71%~60%。

样品测定: 采用高效液相色谱法(HPLC)测定样品中人参皂苷 Re、Rb1、Rg1 含量。分别精密吸取对照品溶液 10 μL(V_s)与供试品溶液 10~20 μL(V_i), 注入液相色谱仪测定, 测得对照品峰面积(A_s), 供试品峰面积(A_i)。

$$C_i = C_s \times \frac{V_s}{V_i} \times \frac{A_i}{A_s} \quad \text{式 (7)}$$

成分含量(mg/g) = $C_i \times V \times \text{稀释倍数} / W$

式中, C_i : 供试品浓度, mg/mL; V_i : 供试品进样量, μL; A_i : 供试品峰面积; C_s : 对照品浓度, mg/mL; V_s : 对照品进样量, μL; A_s : 对照品峰面积; V : 供试品体积, mL; W : 精密称取提取物质量, g。

1.2.3.2 总多糖测定 参照牛晓方等^[21]方法,以葡萄糖为标准品,制备得回归方程为 $y=7.2892x+0.0398$ ($R^2=0.9998$),以此计算样品各极性部位中总多糖含量(x_t)。

$$\text{多糖含量}(\text{mg/g}) = \frac{x_t \times D}{W} \quad \text{式(8)}$$

式中, y : 吸光度值, x_t : 测定得总多糖含量, mg ; D : 稀释倍数; W : 样品取样量, g 。

1.2.3.3 总皂苷测定 参考刘瑞等^[22]的方法,以人参皂苷 Re 为标准品,制备得回归方程为 $y=4.4292x-0.01$ ($R^2=0.9973$),以此计算样品各极性部位中总皂苷含量(x_g)。

$$\text{皂苷含量}(\text{mg/g}) = \frac{x_g \times D}{W} \quad \text{式(9)}$$

式中, y : 吸光度值, x_g : 测定得总皂苷含量, mg ; D : 稀释倍数, W : 样品取样量, g 。

1.2.3.4 总黄酮测定 参考华晶忠等^[23]方法,以芦丁为标准品,制备得回归方程为 $y=3.3694x-0.0737$ ($R^2=0.9993$),以此计算样品各极性部位中总黄酮含量(x_h)。

$$\text{黄酮含量}(\text{mg/g}) = \frac{x_h \times D}{W} \quad \text{式(10)}$$

式中, y : 吸光度值, x_h : 测定得总黄酮含量, mg ; D : 稀释倍数, W : 样品取样量, g 。

1.2.3.5 总酚酸测定 参考何峰等^[24]的方法,以没食子酸为标准品,制备得回归方程为 $y=12.082x+0.0059$ ($R^2=0.9998$),以此计算样品各极性部位中总酚酸含量(x_s)。

$$\text{酚酸含量}(\text{mg/g}) = \frac{x_s \times D}{W} \quad \text{式(11)}$$

式中, y : 吸光度值, x_s : 测定得总酚酸含量, mg ; D : 稀释倍数, W : 样品取样量, g 。

1.2.4 熵权法 假设给定了 n 个样本, k 个指标,本研究中 $n=5$, $k=12$ 。由此组成单元序列 $\{X_{ij}\}$ ($i=1, 2, 3, \dots, n$; $j=1, 2, 3, \dots, k$), 对原始数据进行标准化处理。

1.2.4.1 数据标准化处理 按下列公式对 12 个指标的原始数据标准化处理。

若为正向指标,则

$$Y_{ij} = [X_{ij} - \min(X_{ij})] / [\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})] \quad \text{式(12)}$$

若为负向指标,则

$$Y_{ij} = [\min(X_{ij}) - X_{ij}] / [\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})] \quad \text{式(13)}$$

式中, Y_{ij} : 标准化处理后数据; X_{ij} : 原始数据, 第 i 个样品第 j 个指标值。

1.2.4.2 各指标的信息熵

根据信息熵(E_j)的定义,信息熵的计算公式:

$$E_j = -\ln(n) - 1 \sum p_{ij} \ln p_{ij} \quad \text{式(14)}$$

$P_{ij}=Y_{ij}/\sum Y_{ij}$, 若 $p_{ij}=0$, 则 $\ln p_{ij}=0$ 。确定各指标信息熵后,计算各指标权重(W_i),计算公式为:

$$W_i = (1 - E_i) / (k - \sum E_i) \quad \text{式(15)}$$

式中, E_i : 样品第 i 个指标的信息熵。

1.2.5 灰色关联度分析

1.2.5.1 原始数据规格化处理 由于各评价指标间数据差异较大,故对原始数据进行规格化处理。处理公式:

$$Y_{ik} = X_{ik} / X_k \quad \text{式(16)}$$

式中, Y_{ik} : 第 i 个样本第 k 个指标的规格化处理数据, X_{ik} : 第 i 个样本第 k 个指标的原始数据, X_k : 样品第 k 个指标的均值。

1.2.5.2 关联系数计算 按下列公式计算相对最优参考序列 $\{Y_{sk}\}$ 和最差参考序列 $\{Y_{tk}\}$ 关联系数。

$$\xi_{k(s)} = (\Delta \min + \rho \Delta \max) / (|Y_{ik} - Y_{sk}| + \rho \Delta \max) \quad \text{式(17)}$$

式中, $\Delta \min = \min |Y_{ik} - Y_{sk}|$; $\Delta \max = \max |Y_{ik} - Y_{sk}|$ 。

$$\xi_{k(t)} = (\Delta \min + \rho \Delta \max) / (|Y_{ik} - Y_{tk}| + \rho \Delta \max) \quad \text{式(18)}$$

式中, $\Delta \min = \min |Y_{ik} - Y_{tk}|$; $\Delta \max = \max |Y_{ik} - Y_{tk}|$; ρ : 分辨系数,本研究以 1.2.4.2 项下公式计算所得指标权重(W_i)为该系数取值。

1.2.5.3 关联度计算 按下列公式计算相对于最优参考序列 $r_{i(s)}$ 和最差参考序列 $r_{i(t)}$ 关联度。

$$r_{i(s)} = \sum \xi_{k(s)} / n \quad \text{式(19)}$$

$$r_{i(t)} = \sum \xi_{k(t)} / n \quad \text{式(20)}$$

1.2.5.4 相对关联度计算 相对关联度 r_i 与最优和最差参考序列关联度密切相关,按下列公式计算:

$$r_i = r_{i(s)} / [r_{i(s)} + r_{i(t)}] \quad \text{式(21)}$$

根据 n 个样品相对关联度大小排序,最终为优劣评价结果。

1.3 数据处理

采用 Excel 2021 版进行数据处理,SPSS 23.0 软件进行统计学分析及 LSD 多重比较,以 $P<0.05$ (双侧)为差异有统计学意义,所有试验进行 3 次重复。应用 Matlab R2016b 进行权重计算和灰色关联度分析。

2 结果与分析

2.1 人参提取物不同极性部位抗氧化能力

2.1.1 人参提取物不同极性部位对超氧阴离子清除能力 提取物不同极性萃取物对超氧阴离子清除能力见图 1、表 1,在实验浓度范围内,随着浓度不断增加,各部位对超氧阴离子清除能力大大增强。清除超氧阴离子的 IC_{50} 值分别为 1.15 mg/mL (R)、1.27 mg/mL (R1)、1.29 mg/mL (R2)、1.17 mg/mL (R3)、0.75 mg/mL (R4)。结果表明 R4 的超氧阴离子清除能力相对最强,这可能是因为人参正丁醇部

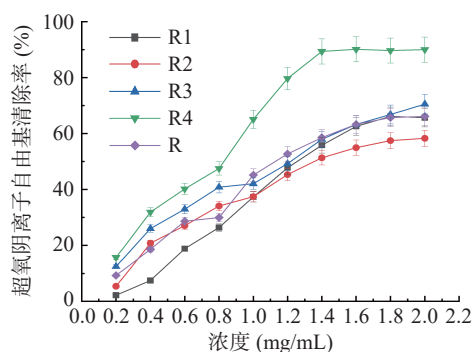


图 1 人参提取物不同极性部位的超氧阴离子自由基清除率
Fig.1 Superoxide anion free radical clearance rates of different polar parts of ginseng extract

注: R1-石油醚部位; R2-氯仿部位; R3-乙酸乙酯部位; R4-正丁醇部位; R-水部位; 图 2~图 6 同。

表 1 人参不同极性部位对各自由基的 IC_{50} 值结果

Table 1 Results of IC_{50} of free radicals at different polarity sites of ginseng

活性部位	IC_{50} 值(mg/mL)			
	DPPH	ABTS ⁺	羟基	超氧阴离子
R1	1.13	1.67	1.83	1.27
R2	0.94	1.49	1.56	1.29
R3	0.86	1.11	1.14	1.17
R4	0.14	0.57	0.92	0.75
R	0.34	0.69	0.91	1.15

位中总酚酸、总皂苷、总黄酮类化学物质成分含量较高,超氧阴离子可与其很好的结合,因此对超氧阴离子的清除能力较强。该结果与何紫艳^[25]关于人参皂苷元体外抗氧化活性研究结果一致。

2.1.2 人参提取物不同极性部位对羟基自由基清除能力 人参不同极性部位对羟基自由基的清除率结果如图 2、表 1 所示,人参各部位都具有羟基自由基清除能力,且随着浓度的增加,各部位对羟基自由基清除能力不断增强。清除羟基自由基的 IC_{50} 值分别为 0.91 mg/mL(R)、1.83 mg/mL(R1)、1.56 mg/mL(R2)、1.14 mg/mL(R3)、0.92 mg/mL(R4)。结果表明 R 的羟基自由基清除能力相对最强,该结果可能与人参各部位中的总多糖、总黄酮类等成分具有活泼的酚羟基,在遇到活性氧自由基时,易失去酚羟基

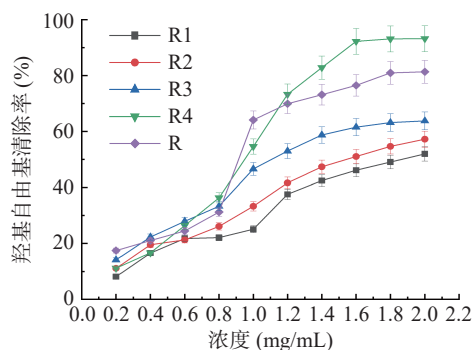


图 2 人参提取物不同极性部位的羟基自由基清除率
Fig.2 Hydroxyl free radical clearance rates of different polar parts of ginseng extract

上的氢,具有直接清除羟基自由基、 H_2O_2 等活性氧、自由基的作用有关^[26]。

2.1.3 人参提取物不同极性部位对 DPPH 自由基清除能力 人参不同极性部位对 DPPH 自由基的清除率结果如图 3、表 1 所示,人参各部位都具有明显的 DPPH 自由基清除能力,且在实验浓度范围内,随着浓度的增加,各部位对 DPPH 自由基清除能力逐渐增强。清除 DPPH 自由基的 IC_{50} 值分别为 0.34 mg/mL(R)、1.13 mg/mL(R1)、0.94 mg/mL(R2)、0.86 mg/mL(R3)、0.14 mg/mL(R4)。结果表明 R4 的 DPPH 自由基清除能力相对最强,这可能是因为人参正丁醇部位中总酚酸、总皂苷、总黄酮类能与自由基发生化学反应,干扰自由基链式反应发生,从而产生抗氧化作用^[27]。

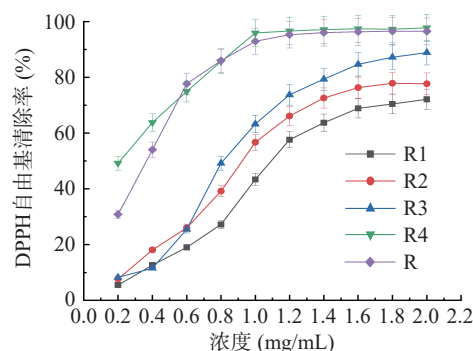


图 3 人参提取物不同极性部位的 DPPH 自由基清除率
Fig.3 DPPH free radical clearance rates of different polar parts of ginseng extract

2.1.4 人参提取物不同极性部位对 ABTS⁺自由基清除能力 人参提取物不同极性部位对 ABTS⁺自由基的清除率结果如图 4、表 1 所示。人参各部位都具有明显的 ABTS⁺自由基清除能力,在实验浓度范围内,随浓度增加各部位对 ABTS⁺自由基清除能力不断增强。清除 ABTS⁺自由基的 IC_{50} 值分别为 0.69 mg/mL(R)、1.67 mg/mL(R1)、1.49 mg/mL(R2)、1.11 mg/mL(R3)、0.57 mg/mL(R4)。结果表明 R4 的 ABTS⁺自由基清除能力相对最强,说明人参正丁醇部位具有非常好的 ABTS⁺自由基清除活性,该结

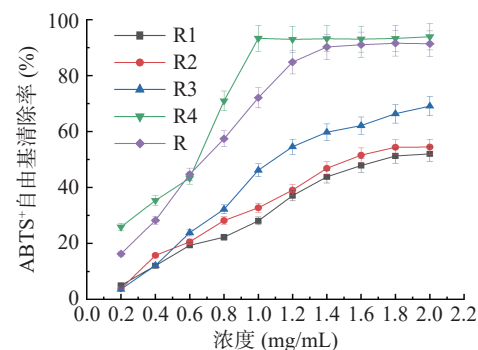


图 4 人参提取物不同极性部位的 ABTS⁺自由基清除率
Fig.4 ABTS⁺ free radical clearance rates of different polar parts of ginseng extract

果与刘士伟^[28]利用植物乳杆菌发酵人参中活性成分抗氧化研究结果一致。

2.1.5 人参不同极性部位对 H₂O₂ 诱导的 SH-SY5Y 细胞氧化损伤的保护能力 提取物不同极性部位对 H₂O₂ 诱导的 SH-SY5Y 细胞氧化损伤有保护能力, 如图 5 所示, 相比于模型组, SH-SY5Y 细胞在空白组正常贴壁状态下呈上皮样, 有短触角延伸, 成簇生

长; 在应用 H₂O₂ 诱导损伤后, 细胞形态变大变圆, 轮廓不清晰; 经过给药处理后的镜下见细胞形态接近于正常状态。采用 CCK-8 法检测细胞存活率结果如图 6, 显示与模型组相比各组样品均提高了细胞存活率。表明人参不同极性部位可以改善 H₂O₂ 诱导的细胞氧化损伤, 其中正丁醇部位对细胞氧化损伤保护能力相对最强。

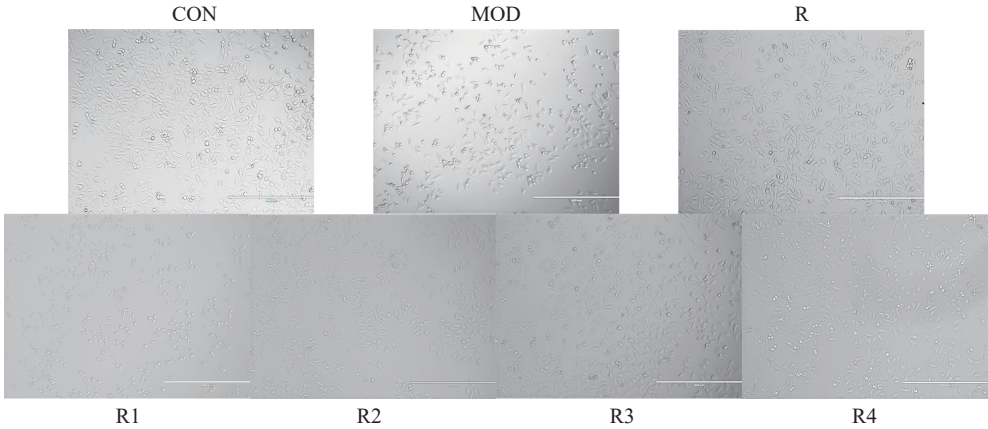


图 5 人参提取物不同极性部位对 H₂O₂ 诱导的 SH-SY5Y 细胞氧化损伤的保护能力(400 μm)

Fig.5 Ability of different polar parts of ginseng extract to protect against H₂O₂-induced oxidative damage in SH-SY5Y cells (400 μm)

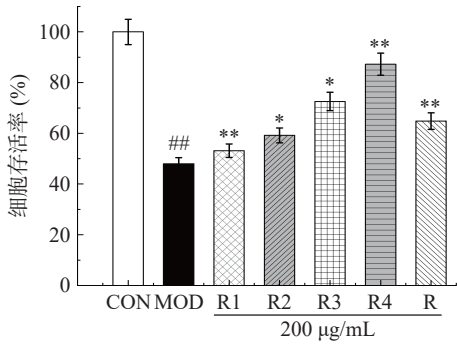


图 6 人参提取物不同极性部位对 H₂O₂ 诱导的 SH-SY5Y 细胞氧化损伤细胞存活率对比图

Fig.6 Cell survival rate of H₂O₂ induced oxidative damage in SH-SY5Y cells at different polar sites of ginseng extract
注: 与 CON 组比较, ##*P*<0.01; 与 MOD 组比较**P*<0.05, ***P*<0.01。

2.2 人参不同极性部位成分含量

本研究采用高效液相色谱法对人参单体成分进行含量测定, 由表 2 可知, 随着萃取溶剂的极性增大, 人参皂苷 Rg1、Re、Rb1 含量逐渐增高, 其中正丁醇萃取物中单体皂苷的含量高于水提取物与其余萃取

物。同时, 我们应用紫外分光光度计对人参水提取物和各萃取物中的总物质进行含量测定可知, 正丁醇萃取物中的总酚酸、总皂苷、总黄酮含量高于水提取物与其它萃取物, 分别为 3.97%、37.76%、34.79%。以上研究结果表明正丁醇可以相对充分提取人参中的有效成分。

2.3 人参不同极性部位成分与抗氧化活性相关性分析

如表 3 所示, 人参不同极性部位成分含量及抗氧化能力相关性分析结果表明, DPPH 自由基 IC₅₀ 值与总酚酸、总黄酮、人参皂苷 Re、人参皂苷 Rb1 含量呈极显著负相关(*P*<0.01), 与总皂苷、总多糖、人参皂苷 Rg1 含量呈显著负相关(*P*<0.05)。说明 DPPH 自由基的清除是人参中多种成分共同作用的结果, 总酚酸、总黄酮等成分含量越高 DPPH 自由基清除率越高, 由表 2 可知在人参不同极性部位中, 正丁醇部位的总酚酸、总黄酮等含量相对最高, 表明正丁醇部位对 DPPH 自由基清除能力相对最好。ABTS⁺自由基 IC₅₀ 值与总多糖、总黄酮、人参皂苷 Re、人参皂苷 Rb1 含量呈显著负相关(*P*<0.05), 说明当人参中总多糖、总黄酮、人参皂苷 Re 等含量越

表 2 人参不同极性部位成分含量

Table 2 Composition content of *Panax ginseng* of different polar parts

活性部位	出膏率(%)	总酚酸(mg/g)	总皂苷(mg/g)	总多糖(mg/g)	总黄酮(mg/g)	人参皂苷Rg1(mg/g)	人参皂苷Re(mg/g)	人参皂苷Rb1(mg/g)
R1	5.80	0.41±0.01	0.54±0.02	5.75±0.13	0.64±0.02	0.2535±0.0061	1.1023±0.0276	0.7673±0.0176
R2	1.40	0.62±0.03	0.45±0.02	5.75±0.13	0.91±0.03	0.5808±0.0198	2.5251±0.0404	0.9066±0.0163
R3	1.00	1.15±0.04	4.24±0.08	18.19±0.24	11.30±0.14	0.6783±0.0176	2.9489±0.0561	1.7933±0.0430
R4	2.80	3.97±0.10	37.76±0.42	47.39±0.43	34.79±0.35	1.6504±0.0379	7.1758±0.0861	5.3288±0.0853
R	5.80	3.71±0.11	12.78±0.19	66.14±0.79	20.16±0.31	0.8489±0.0195	4.7558±0.1379	3.2185±0.0836

表 3 人参不同极性部位成分与抗氧化能力相关性分析

Table 3 Correlation analysis of antioxidant ability and components in different polar parts of *Panax ginseng*

考察指标	总酚酸含量	总皂苷含量	总多糖含量	总黄酮含量	人参皂苷 Rg1 含量	人参皂苷 Re 含量	人参皂苷 Rb1 含量	DPPH 自由基 IC ₅₀ 值	ABTS ⁺ 自由基 IC ₅₀ 值	羟基自由基 IC ₅₀ 值	超氧阴离子自由基 IC ₅₀ 值	细胞氧化损伤保护能力
总酚酸含量	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
总皂苷含量	0.854	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
总多糖含量	0.953*	0.661	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
总黄酮含量	0.936*	0.957*	0.808	—	—	—	—	—	—	—	—	—
人参皂苷 Rg1 含量	0.842	0.968**	0.65	0.950*	—	—	—	—	—	—	—	—
人参皂苷 Re 含量	0.930*	0.950*	0.788	0.973**	0.979**	—	—	—	—	—	—	—
人参皂苷 Rb1 含量	0.937*	0.976**	0.795	0.995**	0.963**	0.982**	—	—	—	—	—	—
DPPH 自由基 IC ₅₀ 值	-0.986**	-0.897*	-0.902*	-0.959**	-0.912*	-0.976**	-0.964**	—	—	—	—	—
ABTS ⁺ 自由基 IC ₅₀ 值	-0.961**	-0.830	-0.912*	-0.950*	-0.866	-0.938*	-0.929*	0.969**	—	—	—	—
羟基自由基 IC ₅₀ 值	-0.880*	-0.704	-0.866	-0.87	-0.786	-0.862	-0.832	0.895*	0.972**	—	—	—
超氧阴离子自由基 IC ₅₀ 值	-0.788	-0.986**	-0.578	-0.943*	-0.961**	-0.919*	-0.953*	0.842	0.798	0.687	—	—
细胞氧化损伤保护能力	0.704	0.877	0.516	0.896*	0.933*	0.882*	0.879*	-0.785	-0.816	-0.791	-0.925*	—

注: *在 $P<0.05$ 水平(双侧)上显著相关; **在 $P<0.01$ 水平(双侧)上显著相关。

高 ABTS⁺ 自由基的清除率越高,由表 2 可知在人参不同极性部位中,正丁醇部位的总黄酮、人参皂苷 Re 含量相对最高,表明正丁醇部位对 ABTS⁺ 自由基清除能力相对最好。羟基自由基的 IC₅₀ 值与总酚酸含量呈负相关,说明在不同极性部位中总酚酸含量越高对羟基自由基的清除能力越强,由表 2 可知,在人参不同极性部位中,正丁醇部位的总酚酸含量相对最高,表明正丁醇部位对羟基自由基清除能力相对最强。超氧阴离子自由基 IC₅₀ 值与总皂苷、人参皂苷 Rg1 含量呈极显著负相关($P<0.01$),与总黄酮、人参皂苷 Re、人参皂苷 Rb1 含量呈显著负相关($P<0.05$),说明总皂苷、人参皂苷 Rg1 等成分含量越高超氧阴离子自由基清除率越高,由表 2 可知在人参不同极性部位中,正丁醇部位的总皂苷、人参皂苷 Rg1 含量相对最高,表明正丁醇部位对超氧阴离子清除能力相对最好。细胞氧化损伤保护能力与总黄酮、人参皂苷 Rg1、人参皂苷 Re、人参皂苷 Rb1 含量呈显著正相关($P<0.05$),说明在不同极性部位中人参总黄酮、皂苷 Rg1 等成分含量越高保护细胞氧化损伤能力越强。因此,通过以上相关性分析结果表明人参抗氧化活性及氧化损伤细胞保护能力与不同极性部位中活性成分含量密切相关,在人参不同极性部位中,正丁醇部位的总酚酸、总皂苷、总黄酮、人参皂苷 Rg1 等成分含量相对最高,侧面验证说明正丁醇部位可能是人参提取物抗氧化活性最佳极性部位。

2.4 人参不同极性部位灰色关联分析

灰色关联分析是对运行机制与物理原型不清晰的灰关系序列化、模式化,进而建立灰关联分析模型,目的在于寻求一种能够衡量各因素间关联度大小

的量化方法,确定参考数列与其他比较数列间的关联程度,能够更直观评价不同样品间的优劣^[29]。为准确表明人参何种极性部位具有良好的抗氧化活性和氧化损伤细胞保护能力,采用熵权法结合灰色关联度法进一步数据分析。

2.4.1 熵权法所得信息熵值及指标权重 据信息熵定义,对于某项指标,可用熵值来判断其离散程度,信息熵值越小,指标离散程度越大,则该指标对综合评价的影响就越大。以指标权重(W_i)作为计算灰色关联系数的分辨系数,可使结果更加准确可信。因此,本研究利用信息熵这个工具,计算各个指标的权重,结果见表 4。

表 4 熵权法计算所得信息熵及权重		
Table 4 Information entropy and weight are calculated by entropy weight method		
考察指标	信息熵值	权重
总酚酸含量	0.649	0.092
总皂苷含量	0.489	0.133
总多糖含量	0.632	0.094
总黄酮含量	0.621	0.096
人参皂苷 Rg1	0.757	0.064
人参皂苷 Re	0.765	0.061
人参皂苷 Rb1	0.588	0.108
保护氧化损伤细胞能力	0.753	0.064
DPPH 自由基 IC ₅₀ 值	0.741	0.068
ABTS ⁺ 自由基 IC ₅₀ 值	0.765	0.061
羟基自由基 IC ₅₀ 值	0.810	0.050
超氧阴离子自由基 IC ₅₀ 值	0.590	0.107

2.4.2 灰色关联系数和相对关联度 根据公式(16)

和(17)计算不同极性部位相对最优参考序列和最差参考序列的关联系数,结果见表5~表6。关联度按照公式(18)和(19)进行计算。将相对最优参考序列的关联度最大及相对最差参考序列的关联度最小定义为最佳评价单元,即得到相对关联度,结果见表7。根据相对关联度的大小进行排序,得到不同极性部位抗氧化活性的优劣评价结果,相对关联度值越大,表明该部位抗氧化活性越高。本研究以总酚酸、总皂苷、总多糖含量等12个指标,通过灰色关联模型和熵权模型,对人参不同极性部位抗氧化活性进行

表5 各比较序列相对于最优参考序列的关联系数

Table 5 Association coefficients of each comparative sequence relative to the optimal reference sequence

考察指标	R1	R2	R3	R4	R
总酚酸含量	0.9544	0.9639	0.9714	0.9940	0.9791
总皂苷含量	0.5926	0.5894	0.6436	0.9439	0.7205
总多糖含量	0.5339	0.5227	0.6515	0.7783	0.6789
总黄酮含量	0.6159	0.6206	0.8256	0.9481	0.8800
人参皂苷Rg1	0.9862	0.9959	0.9959	0.9976	0.9910
人参皂苷Re	0.9421	0.9815	0.9819	0.9890	0.9879
人参皂苷Rb1	0.9532	0.9562	0.9712	0.9919	0.9830
DPPH自由基 IC ₅₀ 值	0.9301	0.9474	0.9692	1.0000	0.9940
ABTS ⁺ 自由基 IC ₅₀ 值	0.9056	0.9247	0.9674	0.9993	0.9930
羟基自由基 IC ₅₀ 值	0.9019	0.9266	0.9724	0.9986	0.9937
超氧阴离子自由基 IC ₅₀ 值	0.9319	0.9385	0.9684	0.9990	0.9846
细胞氧化损伤保护能力	0.3338	0.3334	0.4433	0.8790	0.9680

表6 各比较序列相对于最差参考序列的关联系数

Table 6 Association coefficients for each comparative sequence relative to the worst reference sequence

考察指标	R1	R2	R3	R4	R
总酚酸含量	1.0000	0.9897	0.9817	0.9477	0.9339
总皂苷含量	0.9940	0.9968	0.8756	0.5662	0.7630
总多糖含量	0.9996	0.9605	0.7444	0.6259	0.4221
总黄酮含量	1.0000	0.9877	0.7045	0.5916	0.6686
人参皂苷Rg1	1.0000	0.9815	0.9901	0.9832	0.9951
人参皂苷Re	0.9999	0.9242	0.9582	0.9310	0.9524
人参皂苷Rb1	1.0000	0.9967	0.9807	0.9446	0.9687
DPPH自由基 IC ₅₀ 值	0.9999	0.9803	0.9577	0.9289	0.9343
ABTS ⁺ 自由基 IC ₅₀ 值	0.9999	0.9772	0.9330	0.9047	0.9100
羟基自由基 IC ₅₀ 值	0.9999	0.9707	0.9243	0.9015	0.9056
超氧阴离子自由基 IC ₅₀ 值	0.9985	0.9909	0.9591	0.9304	0.9435
细胞氧化损伤保护能力	0.9964	0.9999	0.5694	0.3456	0.3333

表7 人参不同极性部位关联度、相对关联度及排序

Table 7 Order of association, relative correlation and quality of Ginseng of different polar parts

活性部位	最优参考序列	最差参考序列	相对关联度	排名
R4	0.96	0.80	0.618	1
R	0.93	0.81	0.504	2
R3	0.86	0.88	0.476	3
R1	0.80	1.00	0.354	4
R2	0.81	0.98	0.352	5

优劣评价,发现人参不同极性部位相对关联度范围为0.352~0.618,说明人参不同极性部位间的抗氧化活性存在一定差异,依据相对关联度大小,显示正丁醇部位排名最前,表明其抗氧化作用相对最优(与氯仿比较有统计学意义 $P<0.05$)。以上说明,通过灰色关联度分析结合熵权法科学评选出正丁醇部位为人参具抗氧化活性的最理想部位。

3 讨论与结论

本研究以人参为原料,应用液-液萃取法将人参水提物依次使用石油醚、氯仿、乙酸乙酯、正丁醇萃取,将其分为水部位、石油醚部位、氯仿部位、乙酸乙酯部位、正丁醇部位五个不同极性部位,通过测定各部位对DPPH自由基、ABTS⁺自由基、羟基自由基、超氧阴离子自由基的清除率及细胞氧化损伤模型的存活率研究各极性部位的抗氧化活性,结合熵权法和灰色关联分析对人参不同极性部位抗氧化活性进行优劣评价。经研究发现人参不同极性部位间抗氧化活性存在一定差异,将人参五种不同极性部位的指标数据以相对关联度综合排序,各极性部位抗氧化活性顺序为:R4>R>R3>R2>R1,正丁醇部位(R4)排名最前,经计算所得相对关联度相对最大(0.618),正丁醇部位的体外抗氧化活性相对最强。此外,还对人参化学成分及抗氧化活性进行相关性分析,阐明二者之间关系。结果显示,人参不同极性部位的化学成分及抗氧化活性间存在显著相关。人参不同极性部位抗氧化活性的变化趋势与其总酚酸、总黄酮、总皂苷含量具有一致性,因此推断其酚酸、黄酮、皂苷类成分可能是人参发挥抗氧化作用的潜在物质基础,同时人参正丁醇部位中总酚酸、总皂苷、总黄酮等成分含量显著高于其他极性部位。由以上推断,本研究通过正丁醇萃取人参水提物所得部位抗氧化活性相对最好,初步优选出正丁醇部位可能为人参最佳抗氧化活性部位。为人参作为天然抗氧化剂的研究及人参抗氧化食品的开发应用提供科学依据。

参考文献

- [1] 徐敬姪,马欣雨,赵佳鹤,等.人参、附子药对配伍及其温阳功效研究概况[J].河北中医,2022,44(7):1224-1228. [XU Jingya, MA Xinyu, ZHAO Jiahe, et al. The compatibility of ginseng and aconite and its warm efficacy[J]. Hebei traditional Chinese medicine, 2022, 44(7): 1224-1228.]
- [2] HAO J J, HU H W Y, LIU J, et al. Integrated metabolomics and network pharmacology study on immunoregulation mechanisms of *Panax ginseng* through macrophages[J]. Evid Based Complement Alternat Med, 2019(2): 3630260.
- [3] SUN Y Z, LIU X Y, FU X J, et al. Discrepancy study of the chemical constituents of *Panax ginseng* from different growth environments with UPLC-MS-based metabolomics strategy[J]. Molecules, 2023, 28(7): 2928.
- [4] BÁRBARA Z O D, RITA A S D O D, BORDIN F V M, et al. *Panax ginseng* and aging related disorders: A systematic review[J]. Experimental Gerontology, 2022, 161: 111731.
- [5] YU Y H, SUN J H, LIU J J, et al. Ginsenoside re preserves

- cardiac function and ameliorates left ventricular remodeling in a rat model of myocardial infarction[J]. *Journal of Cardiovascular Pharmacology*, 2020, 75(1): 91–97.
- [6] DAEHYO J, JINNATUN N, RAMYA M, et al. Focused review on molecular signalling mechanisms of ginsenosides on anti-lung cancer and anti-inflammatory activities[J]. *Anticancer Agents Med Chem*, 2022, 23(1): 3–14.
- [7] MITHUN R, J. S K, JOHRA K, et al. Dietary polyphenols and their role in oxidative stress-induced human diseases: Insights into protective effects, antioxidant potentials and mechanism(s) of action[J]. *Front Pharmacol*, 2022, 13: 806470.
- [8] 赵雨初, 乔巨慧, 倪伟峰, 等. 人参总皂苷对过氧化氢诱导的红细胞氧化应激的抑制作用及机制研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(19): 6281–6289. [ZHAO Yuchu, QIAO Juhui, NI Weifeng, et al. Inhibitory effect and mechanism of total ginsenosides on hydrogen peroxide induced oxidative stress in red blood cells[J]. *Journal of Food Safety and Quality Testing*, 2022, 13(19): 6281–6289.]
- [9] DIPAYAN P, SUBHASH K, DAS D G, et al. Phytochemical, nutritional and antioxidant potential of *Panax bipinnatifidus* and *Panax pseudoginseng*: A study of two underutilized and neglected species from the Eastern Himalayan region of India[J]. *South African Journal of Botany*, 2022, 149: 837–852.
- [10] 于京华, 岳喜典. 人参的保健功能及其在食品中的应用[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(21): 218–224. [YU Jinghua, YUE Xidian. The Health care function of ginseng and its application in Food [J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(21): 218–224.]
- [11] 吴秀华, 李皓, 昌友权, 等. 人参多糖饮料的制备及其防辐射功效的研究[J]. *食品工业*, 2017, 38(11): 152–157. [WU Xiuhua, LI Hao, CHANG Youquan, et al. Preparation of ginseng polysaccharide beverage and its radiation protection effect[J]. *Food Industry*, 2017, 38(11): 152–157.]
- [12] 于磊娟, 徐镇祥, 邱磊. 柠檬人参超微粉果酒的研究[J]. *酿酒科技*, 2018, 292(10): 76–80, 89. [YU Leijuan, XU Zhenxiang, QIU lei. Study on lemon ginseng ultrafine powder fruit wine[J]. *Brewing Technology*, 2018, 292(10): 76–80, 89.]
- [13] 崔曰新, 张景珍, 王思雨, 等. 基于熵权法和灰色关联度法的羌活饮片质量评价研究[J]. *中草药*, 2019, 50(23): 5724–5730. [CUI Yuexin, ZHANG Jingzhen, WANG Siyu, et al. Research on quality evaluation of qianghuo decoction pieces based on entropy weight method and grey correlation degree method[J]. *Chinese herbal medicine*, 2019, 50(23): 5724–5730.]
- [14] JIN C L, SHU Y, HAN Z Q, et al. Lightning disaster risk zoning in jiangsu province of china based on the analytic hierarchy process and entropy weight method[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10.
- [15] 陈仕学, 姚元勇, 卢忠英, 等. 邻苯三酚自氧化法对茶叶中茶多酚的抗氧化性能应用研究[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(17): 29–36. [CHEN Shixue, YAO Yuanyong, LU Zhongying, et al. Application on the antioxidant properties of tea polyphenols in tea[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(17): 29–36.]
- [16] 吴红伟, 李东辉, 宋沁洁, 等. 黄芪趁鲜切制饮片与传统饮片化学成分及体外抗氧化活性比较研究[J]. *中草药*, 2022, 53(22): 7039–7047. [WU Hongwei, LI Donghui, SONG Qinjie, et al. Comparative study on the chemical composition and in vitro antioxidant activity of *Astragalus* and traditional decoction pieces[J]. *Chinese herbal medicine*, 2022, 53(22): 7039–7047.]
- [17] 乐婷, 王伟伟, 王蔚, 等. 不同等级红茶的抗氧化活性及关键成分比较分析[J/OL]. *现代食品科技*: 1–8 [2023-12-04]. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.8.1175>. [LE Ting, WANG Weiwei, WANG Wei, et al. Comparative analysis of the antioxidant activity and key components of different grades of black tea[J/OL]. *Modern Food Technology*: 1–8 [2023-12-04]. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.8.1175>.]
- [18] 文培华, 颜怡冰, 王文君, 等. 虎耳草总黄酮含量测定及其抗氧化性[J]. *食品工业*, 2022, 43(2): 315–319. [WEN Peihua, YAN Yibing, WANG Wenjun, et al. Determination of total flavonoids and its antioxidant properties[J]. *Food Industry*, 2022, 43(2): 315–319.]
- [19] 于婧文, 郭敏芳, 李苏焱, 等. 黄芪甲苷通过调控线粒体功能抑制 H₂O₂ 诱导的 SH-SY5Y 细胞凋亡[J]. *中国病理生理杂志*, 2022, 38(9): 1553–1560. [YU Jingwen, GUO Minfang, LI Suyao, et al. Astragalus inhibits H₂O₂-induced apoptosis in SH-SY5Y cells by regulating mitochondrial function[J]. *The Chinese Journal of Pathophysiology*, 2022, 38(9): 1553–1560.]
- [20] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典一部[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020. [The National Pharmacopoeia Commission. The Pharmacopoeia 1 of the People's Republic of China[M]. Beijing: China Medical Science and Technology Press, 2020.]
- [21] 牛晓方, 高一军, 怀宝刚, 等. 硫酸-苯酚法测定六种牡丹叶中总多糖的含量[J]. *山东农业工程学院学报*, 2021, 38(4): 33–35. [NIU Xiaofang, GAO Yijun, HUAI Baogang, et al. The content of total polysaccharide in six peony leaves was determined by sulfate-phenol method[J]. *Journal of Shandong College of Agricultural Engineering*, 2021, 38(4): 33–35.]
- [22] 刘瑞, 聂黎行, 陈佳, 等. 生脉注射液中总糖、总皂苷和总木脂素的含量测定方法建立及应用[J]. *中国新药杂志*, 2022, 31(11): 1112–1118. [LIU Rui, NIE Lihang, CHEN Jia, et al. Determination method of total sugar, total saponin and total lignin in injection[J]. *Chinese Journal of New Drugs*, 2022, 31(11): 1112–1118.]
- [23] 华品忠, 王莹, 王嵩, 等. 分光光度法测定桑黄中总黄酮的不确定度评定[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(8): 2498–2502. [HUA Jingzhong, WANG Ying, WANG Song, et al. Uncertainty assessment of total flavonoids in mulberry huang by spectrophotometric method[J]. *Food Safety and Quality Testing Journal*, 2020, 11(8): 2498–2502.]
- [24] 何峰, 余明丽, 姚光哲, 等. 川参通注射液中总酚酸、总黄酮及单糖大类成分的含量测定[J]. *贵州医科大学学报*, 2020, 45(6): 668–671, 688. [HE Feng, YU Mingli, YAO Guangzhe, et al. Determination of total phenolic acids, total flavonoids and monosaccharides in Sichuan injection[J]. *Journal of Guizhou Medical University*, 2020, 45(6): 668–671, 688.]
- [25] 何紫艳. 人参皂苷元的结构修饰、鉴定及体外抗氧化活性的比较研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022. [HE Ziyan. Structural modification, identification, and comparative study on *in vitro* antioxidant activity of ginsenoside[D]. Changchun: Jilin University, 2022.]
- [26] 黄比翼, 陈石梅, 黄锁义, 等. 不同极性溶剂的苹果提取物抗氧化活性研究[J]. *右江民族医学院学报*, 2021, 43(1): 37–40. [HUANG Biyi, CHEN Shimei, HUANG Suoyi, et al. Study on antioxidant activity of grass fruit extract with different polar solvents[J]. *Journal of Youjiang Medical College for Nationalities*, 2021, 43(1): 37–40.]

[27] 李生茂, 李倩茹, 周春阳, 等. 益智总黄酮超声辅助提取工艺的响应面法优化及其抗氧化活性评价[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(8): 43-49. [LI Shengmao, LI Qianru, ZHOU Chunyang, et al. Optimization of ultrasound-assisted extraction technology of total flavonoids from *Alpinia oxyphylla* Fructus by response surface methodology and its antioxidant activities[J]. Storage and Process, 2021, 21(8): 43-49.]

[28] 刘士伟, 刘胜楠, 米倩雯, 等. 植物乳杆菌发酵人参中活性成分改变及抗氧化作用[J/OL]. 食品科学: 1-11[2023-12-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20230308.1319.054.html>. [LIU Shiwei, LIU Shengnan, MI Qianwen, et al. Changes in active con-

stituents and antioxidant effects of *Lactobacillus plantarum* fermented ginseng[J/OL]. Food Science: 1-11[2023-12-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20230308.1319.054.html>.]

[29] 汪恩良, 任志凤, 王储, 等. 基于灰色关联分析模拟月壤抗压强度性能试验[J/OL]. 吉林大学学报(工学版): 1-11[2023-12-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1341.T.20230220.1048.001.html>. [WANG Enliang, REN Zhifeng, WANG Chu, et al. Simulation of lunar soil compressive strength performance test based on grey correlation analysis[J/OL]. Journal of Jilin University (Engineering Edition): 1-11[2023-12-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/22.1341.T.20230220.1048.001.html>.]