

东北9种浆果生物活性物质及抗氧化、 抗炎活性比较

张雅男¹, 包怡红^{1,2}, 王金玲^{1,2*}

(1. 东北林业大学生命科学学院, 黑龙江哈尔滨 150040)

(2. 黑龙江省森林食品资源利用重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150040)

摘要:为促进东北地区浆果相关产品的开发与利用,以东北9种种植范围广且常见的浆果为研究对象,测定分析浆果中总酚、总黄酮和总花色苷含量,通过高效液相色谱法测定浆果中酚类单体的种类和含量;通过测定DPPH自由基清除能力、ABTS⁺自由基清除能力、透明质酸酶抑制能力和抑制白蛋白变性能力评价浆果抗氧化活性和抗炎活性,并进行相关性分析。结果显示,红豆越橘和蓝靛果中总酚、总黄酮和总花色苷含量较高,分别为2.83和2.42 g GAE/100 g DW、0.99和2.09 g Rutin/100 g DW、104.33和414.73 mg/100 g DW,且二者具有较强的抗氧化活性和抗炎活性。相关性结果表明,总酚含量决定浆果的抗氧化活性和抗炎活性。在9种浆果中鉴定并定量19种单体酚,绿原酸、隐绿原酸、熊果苷和黄芩素均在浆果中检出,绿原酸和隐绿原酸是大部分浆果中主要的酚类单体,红豆越橘中单体酚种类最多,蓝靛果中单体酚含量最高。该实验为东北浆果的综合利用提供理论依据。

关键词:浆果;生物活性物质;抗氧化活性;抗炎活性;酚类单体

文章编号: 1673-9078(2025)03-44-53

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.3.1418

Comparison on the Bioactive Substances, Antioxidant Capacities and Anti-inflammatory Activities of 9 Kinds of Berries in Northeast China

ZHANG Ya'nan¹, BAO Yihong^{1,2}, WANG Jinling^{1,2*}

(1.College of Life Science, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

(2.Key Laboratory of Forest Food Resources Utilization of Heilongjiang Province, Harbin 150040, China)

Abstract: In order to promote the development and utilization of berry-related products in Northeast China, 9 kinds of berries widely cultivated and common in Northeast China were used as the research objects, the contents of total phenols, total flavonoids and total anthocyanins in were determined and analyzed. The types and contents of the phenolic monomers in these berries were determined by high performance liquid chromatography. The antioxidant activity and anti-inflammatory activity of the berries were evaluated by measuring DPPH· scavenging ability, ABTS⁺· scavenging ability, hyaluronidase inhibitory ability and albumin denaturation inhibitory ability, and correlation analysis was conducted. The results showed that

引文格式:

张雅男,包怡红,王金玲.东北9种浆果生物活性物质及抗氧化、抗炎活性比较[J].现代食品科技,2025,41(3):44-53.

ZHANG Ya'nan, BAO Yihong, WANG Jinling. Comparison on the bioactive substances, antioxidant capacities and anti-inflammatory activities of 9 kinds of berries in northeast China [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(3): 44-53.

收稿日期: 2023-11-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1600500); 中央高校基本科研业务费专项(2572022DX05)

作者简介: 张雅男(1999-),女,硕士研究生,研究方向:植物活性物质, E-mail: 2021125039@nefu.edu.cn

通讯作者: 王金玲(1975-),女,博士,教授,研究方向:植物活性物质、微生物与发酵, E-mail: wangjinling08@163.com

the contents of total phenols, total flavonoids and total anthocyanins in blue honeysuckle and lingonberry were higher, which were 2.83 and 2.42 g GAE/100 g DW, 0.99 and 2.09 g Rutin/100 g DW, 104.33 and 414.73 mg/100 g DW, respectively. These two berries had strong antioxidant and anti-inflammatory activities. The correlation results showed that the total phenolic content determined the antioxidant and anti-inflammatory activities of the berries. 19 monomer phenols were identified and quantified in 9 berries, with chlorogenic acid, cryptochlorogenic acid, arbutin and baicalein all being detected in berries. Chlorogenic acid and cryptochlorogenic acid were the main phenolic monomers in most berries. Among them, the number of the type of monomer phenol species in lingonberry and the content of the monomer phenols in blue honeysuckle were the highest. This experiment provides a theoretical basis for the comprehensive utilization of berries in Northeast China.

Key words: berries; bioactive substance; antioxidant activity; anti-inflammatory activity; phenolic monomer

浆果是食品研究领域的一大热点, 具有风味独特、色泽鲜艳、营养价值高等特点, 口感丰富, 深受消费者欢迎, 市场潜力巨大^[1]。同时浆果中含有丰富的酚类化合物、黄酮类化合物和花色苷等多种生物活性物质, 具有较强的抗氧化、抗炎、抗癌和降血脂等功能活性^[2]。例如黑加仑、红加仑和白加仑的果实中含有多种酚类单体, 具有降血脂、降血压、抗衰老和提高免疫力等功能^[3]; 红豆越橘和蓝靛果中富含多酚、黄酮类化合物和花青素, 具有显著的抗氧化、抗癌和抗心血管疾病等功效^[4,5]; 沙棘果实营养价值很高, 含有黄酮等活性成分, 具有预防心血管疾病、抗氧化和降血糖的作用^[6]; 软枣猕猴桃中含有较丰富的酚类化合物, 具有多种保健功能, 例如抗氧化、抗肿瘤、预防肥胖等^[7]。因此, 浆果被认为是一类潜在的绿色健康功能性食品。

众所周知, 氧化应激会改变机体正常生理性能, 是导致炎症、心血管或代谢紊乱疾病的相关因素^[8], 而浆果中活性物质的抗氧化作用能够预防氧化应激引起的疾病^[9], 此外, 浆果中多酚等活性物质也被证明具有良好的抗炎作用, 可作为功能食品和膳食补充剂的潜在成分^[10]。本研究选择了东北9种植面积广且常见的浆果: 沙棘、蔓越莓、黑加仑、红加仑、白加仑、红豆越橘、蓝靛果、红树莓和软枣猕猴桃, 测定、分析、比较不同品种浆果在生物活性物质和酚类单体含量上的差异, 对9种浆果的抗氧化能力和抗炎活性进行分析比较, 并进行相关性分析, 为东北地区更好品质浆果的选择和以功能活性为目标的高质量产业开发及综合利用提供理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 原料与试剂

沙棘、蔓越莓、黑加仑、红加仑、白加仑、红

豆越橘、蓝靛果、红树莓和软枣猕猴桃均产自黑龙江省哈尔滨市, 商业成熟期采摘速冻后于-18℃保存。福林酚、透明质酸酶、对二甲氨基苯甲醛(PDMAB)、牛血清蛋白, 北京博奥拓达科技有限公司; 碳酸钠、亚硝酸钠、硝酸铝、氢氧化钠、氯化钾、醋酸钠、盐酸、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH·)、2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸(ABTS⁺), 天津市天力化学试剂有限公司; 标准品: 没食子酸、鞣花酸、绿原酸、隐绿原酸、新绿原酸、龙胆酸、对羟基苯甲酸、咖啡酸、对香豆酸、芥子酸、丁香酸、熊果苷、儿茶素、表儿茶素、芦丁、槲皮素、槲皮苷、黄芩素和树莓酮, 上海源叶生物有限公司。

1.2 主要仪器设备

BS 200S-WEI型电子天平, 北京赛多利斯仪器系统有限公司; 1260 Infinity II型高效液相色谱, 美国安捷伦科技有限公司; ELx800NB型酶标仪, 美国Bio Tek公司; TDL-5-W型台式低速离心机, 湖南星科科学仪器有限公司; 721可见分光光度计, 上海佑科仪器仪表有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品制备

9种东北浆果解冻后, 使用电子天平精确称取9种浆果样品各100g, 用榨汁机将浆果样品充分匀浆后, 使用8层纱布过滤, 将滤液转移至离心管中进行离心(8000 r/min, 15 min), 离心后的上清液于4℃保存, 用于生物活性物质和功能活性的测定。

1.3.2 总酚、总黄酮的测定

根据福林酚法^[11]测定9种浆果中总酚含量, 进行3组平行试验, 吸光值带入没食子酸标准曲线得到样品中没食子酸浓度, 进而计算浆果中总酚含量,

结果表示为 g GAE/100 g DW (GAE: 没食子酸, DW: 浆果干重)。根据硝酸铝比色法^[12]测定 9 种浆果中总黄酮含量, 进行 3 组平行试验, 吸光值带入芦丁标准曲线得到样品中芦丁浓度, 进而计算得到浆果中总黄酮含量, 结果表示为 g Rutin/100 g DW (Rutin: 芦丁)。

1.3.3 总花色苷的测定

参照 Tan 等^[13]的方法。取 1.0 mL 样品溶液加入到 10 mL 刻度试管中, 分别使用 pH 值 1.0 和 pH 值 4.5 缓冲液 (pH 值 1.0 缓冲液: 14.9 g KCl 用蒸馏水定容至 1 000 mL, 用盐酸调节 pH 值至 1.0; pH 值 4.5 缓冲液: 16.4 g NaAc 用蒸馏水定容至 1 000 mL, 用盐酸调节 pH 值至 4.5) 定容到 10 mL, 放置于暗处反应 (pH 值 1.0 为 50 min, pH 值 4.5 为 80 min), 设置酶标仪分别在 510 nm、700 nm 波长下测定吸光值, 进行 3 组平行试验, 按式 (1) 计算浆果样品中总花色苷含量。

$$D_1 = \frac{A \times M}{\epsilon \times L} \times DF \times 1000 \quad (1)$$

式中:

D_1 ——花色苷含量, mg/L;

A ——吸光值, $A = (A_{520 \text{ nm, pH } 1.0} - A_{700 \text{ nm, pH } 1.0}) - (A_{520 \text{ nm, pH } 4.5} - A_{700 \text{ nm, pH } 4.5})$;

M ——矢车菊素-3-葡萄糖苷的分子量;

ϵ ——矢车菊素-3-葡萄糖苷的消光系数, 26 900;

L ——比色皿路径长度 (1 cm);

DF ——稀释因子。

1.3.4 酚类单体

参照余平莲等^[14]的方法, 利用高效液相色谱法 (HPLC) 进行测定, 略有修改。取 1.0 mL 样品溶液经 0.45 μm 的微孔滤膜过滤后转移至高效液相色谱进样瓶中备用。通过 HPLC (1260 Infinity II, Agilent Technology) 和 Agilent ZORBAX Eclipse Plus C18 色谱柱 (250 mm \times 4.6 mm, 5 μm) 对酚类化合物进行定性和定量分析。流动相 A 为甲醇 (色谱级), 流动相 B 为 0.02% 甲酸水溶液, 梯度洗脱程序: 0~5 min, 0~10% A, 100%~90% B; 5~10 min, 10%~20% A, 90%~80% B; 10~20 min, 20%~35% A, 80%~65% B; 20~35 min, 35%~40% A, 65%~60% B; 35~40 min, 40%~75% A, 60%~25% B; 40~45 min, 75%~10% A, 25%~90% B; 流动相流量: 36 mL, 进样量为 10 μL , 柱温为 35 $^{\circ}\text{C}$, 检测波长为 280 nm, 依次测定标准品和样品。数据结

果以 mg/g·DW 表示。

标准曲线的制作: 分别将 19 种标准品 (见 1.1 原料与试剂) 配制成不同浓度的标准溶液, 经 0.45 μm 的微孔滤膜过滤后进行 HPLC 分析, 得到峰面积 (x) 和标准品质量浓度 (y) 的回归方程及相关系数。

精密度试验: 参照李小莲^[15]的方法, 分别将 19 种标准品配制成质量浓度为 50 mg/L 的标准溶液, 经 0.45 μm 的微孔滤膜过滤后进行 HPLC 分析, 计算 6 次平行试验的相对标准偏差。

重现性试验: 参照张社利等^[16]的方法, 由不同试验人员分别将 19 种标准品配制成质量浓度为 50 mg/L 的标准溶液, 经 0.45 μm 的微孔滤膜过滤后进行 HPLC 分析, 计算 3 次平行试验的相对标准偏差。

稳定性试验: 参考马艳妮^[17]的方法, 略有修改。分别将 19 种标准品配制成质量浓度为 50 mg/L 的标准溶液, 置于 4 $^{\circ}\text{C}$ 保存, 分别于 0、4、8、12 和 24 h 进样, 计算各单体酚的相对标准偏差。

各标准品的线性关系及相对标准偏差如表 1 所示。由表 1 可知, 19 种单体酚的回归方程呈良好线性关系, 且精密度试验、重现性试验和稳定性试验的相对标准偏差分别为 0.75%~1.94%、1.05%~2.51% 和 0.98%~2.79%, 表明该仪器的精密度良好, HPLC 方法的重现性良好, 所测 19 种单体酚在 24 h 内的稳定性良好, 符合含量测定要求, 可用于测定浆果中的单体酚含量。

1.3.5 DPPH 自由基清除能力测定

参照 Moazzen 等^[18]的方法并略有修改。在 1.0 mL 的样品溶液中加入 2.0 mL、0.1 mmol/L 的 DPPH 自由基乙醇溶液, 避光反应 30 min, 设置样品浓度梯度, 在 517 nm 波长下测定吸光值 (A_1); 用等体积无水乙醇替代 DPPH 溶液, 测定吸光值 (A_2); 用等体积无水乙醇代替样品, 测定吸光值 (A_3)。维生素 C 作为阳性对照, 根据式 (2) 计算浆果样品的 DPPH 自由基清除率, 使用 SPSS 25.0 软件计算相应的 IC_{50} 值。

$$D_2 = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_3}\right) \times 100\% \quad (2)$$

式中:

D_2 ——DPPH 自由基清除率, %;

A_1 ——样品组吸光值;

A_2 ——对照组吸光值;

A_3 ——空白组吸光值。

表 1 19种酚类单体的回归方程、相关系数和相对标准偏差

Table 1 Regression equation, correlation coefficient and relative standard deviation of 19 phenolic monomers

酚类单体	回归方程	相关系数	相对标准偏差/%		
			精密度	重现性	稳定性
没食子酸	$y=11.851x-40.533$	$R^2=0.999\ 7$	1.37	2.34	1.53
鞣花酸	$y=14.185x-418.55$	$R^2=0.999\ 3$	1.94	2.14	1.89
绿原酸	$y=23.016x-243.31$	$R^2=0.999\ 6$	0.93	1.46	1.44
隐绿原酸	$y=2.669\ 6x+12.102$	$R^2=0.999\ 1$	1.85	2.36	2.15
新绿原酸	$y=16.301x+15.809$	$R^2=0.999\ 9$	1.32	1.58	1.76
龙胆酸	$y=0.421\ 6x+1.996\ 7$	$R^2=0.999\ 9$	1.14	1.38	1.03
对羟基苯甲酸	$y=19.886x-3.019\ 3$	$R^2=0.999\ 9$	1.52	2.29	2.42
咖啡酸	$y=40.163x-30.562$	$R^2=0.999\ 9$	1.59	2.06	2.12
对香豆酸	$y=67.546x-65.485$	$R^2=0.999\ 7$	1.74	2.10	1.35
芥子酸	$y=1.101\ 3x-7.181\ 5$	$R^2=0.999\ 8$	0.84	1.87	1.49
丁香酸	$y=46.7x-42.587$	$R^2=0.999\ 9$	1.66	1.35	1.71
熊果苷	$y=36.099x-8.812\ 1$	$R^2=0.999\ 5$	1.83	2.51	1.51
儿茶素	$y=5.033\ 3x+116.06$	$R^2=0.994\ 6$	1.26	1.05	0.98
表儿茶素	$y=10.996x+2.761\ 7$	$R^2=0.997\ 1$	1.79	2.13	2.79
芦丁	$y=11.185x-11.618$	$R^2=0.999\ 9$	1.31	1.95	1.07
槲皮素	$y=19.536x+3.918\ 2$	$R^2=0.999\ 9$	0.75	1.14	1.91
槲皮苷	$y=16.056x-27.189$	$R^2=0.999\ 9$	1.02	1.29	1.08
黄芩素	$y=42.813x$	$R^2=0.999\ 9$	1.29	1.49	2.45
树莓酮	$y=6.596\ 2x+8.452\ 5$	$R^2=0.999\ 9$	1.63	1.55	1.26

1.3.6 ABTS⁺自由基清除能力测定

参照 Qi 等^[19]的方法并略有修改。在 0.5 mL 的样品溶液中加入 1.0 mL 的 ABTS⁺ 溶液，避光反应 6 min，设置样品浓度梯度，在 734 nm 波长下测定吸光值 (A_i)；用相同体积的去离子水替代 ABTS⁺ 溶液，测定吸光值 (A_j)，用相同体积的无水乙醇替代样品，测定吸光值 (A_o)。Vc 作为阳性对照，根据式 (3) 计算浆果样品的 ABTS⁺ 自由基清除率，使用 SPSS 25.0 软件计算相应的 IC₅₀ 值。

$$D_3 = \left(1 - \frac{A_i - A_j}{A_o}\right) \times 100\% \quad (3)$$

式中：

D_3 ——ABTS⁺ 自由基清除率，%；

A_i ——样品组吸光值；

A_j ——对照组吸光值；

A_o ——空白组吸光值。

1.3.7 透明质酸酶抑制能力测定

参照 Perera 等^[20]的方法并略有修改。在 A、C 试管中分别加入 0.5 mL 透明质酸酶，在 B、D

试管中分别加入 0.5 mL NaAc 缓冲液 (pH 值 3.6, 0.1 mol/L)，并在 4 根试管中分别加入 0.1 mL 12.5 mmol/L CaCl₂ 溶液，于 37 °C 保温 10 min。在 C、D 试管中分别加入 0.5 mL 样品溶液，在 A、B 试管中分别加入 0.5 mL 蒸馏水，于 37 °C 保温 10 min。4 根试管中分别加入 0.6 mg/mL 透明质酸钠溶液 0.5 mL，于 37 °C 保温 40 min。4 根试管中分别加入 0.9 mol/L 的 NaOH 溶液 0.1 mL 和 0.2 mol/L Na₂B₄O₇ 溶液 0.2 mL，于 100 °C 加热 5 min 后冷却至室温。加入 67 mmol/L PDMAB 溶液 3.0 mL 于 4 根试管中，37 °C 保温 10 min，585 nm 处测定吸光值。C₁₄H₁₀Cl₂NNaO₂ 作为阳性对照，根据式 (4) 计算透明质酸酶抑制率，使用 SPSS 25.0 软件计算相应的 IC₅₀ 值。

$$D_4 = \left(1 - \frac{A-B}{C-D}\right) \times 100\% \quad (4)$$

式中：

D_4 ——透明质酸酶抑制率，%；

A ——A 试管吸光值；

- B—B 试管吸光值;
- C—C 试管吸光值。
- D—D 试管吸光值。

1.3.8 抑制白蛋白变性能力测定

参照 Gupta 等^[21]的方法并略有修改。取体积分数为 2% 的牛血清白蛋白溶液 2 mL (以 pH 值 5.5、0.1 mol/L NaAc 缓冲液配置), 37 °C 保温 20 min。将 0.5 mL 样品溶液加入上述混合物中, 定容至 5 mL, 于 75 °C 水浴 10 min 后迅速冷却至室温。用紫外分光光度计在 660 nm 处测定样品的浊度。以蒸馏水代替样品作为空白对照测定吸光值。C₁₄H₁₀Cl₂NNaO₂ 作为阳性对照, 根据式 (5) 计算白蛋白变性的抑制率, 使用 SPSS 25.0 软件计算相应的 IC₅₀ 值。

$$D_5 = \frac{A_a - A_b}{A_a} \times 100\% \quad (5)$$

式中:

- D₅—白蛋白变性的抑制率, %;
- A_a—空白组吸光值;
- A_b—样品组吸光值。

1.4 数据处理

每组试验重复进行 3 次, 结果用“平均值 ± 标准偏差”表示, 采用 SPSS 25.0 软件的 Duncan 法分析数据显著性, 显著水平为 0.05, 使用 Origin 2023b 软件绘制图表。

2 结果与讨论

2.1 9 种浆果中生物活性成分比较

9 种东北浆果中总酚、总黄酮和总花色苷含量如表 2 所示。

表 2 9 种东北浆果中总酚、总黄酮和总花色苷含量

品种	总酚/(g GAE/100 g DW)	总黄酮/(g Rutin/100 g DW)	总花色苷/(mg/100 g DW)
沙棘	0.70 ± 0.08 ^f	0.40 ± 0.03 ^g	3.36 ± 0.19 ^h
蔓越莓	1.10 ± 0.05 ^d	1.05 ± 0.15 ^b	61.98 ± 0.60 ^e
黑加仑	1.14 ± 0.04 ^d	0.59 ± 0.03 ^f	131.71 ± 0.75 ^b
红加仑	1.00 ± 0.03 ^c	0.94 ± 0.08 ^{cd}	18.83 ± 0.47 ^f
白加仑	1.24 ± 0.05 ^c	0.90 ± 0.05 ^d	2.14 ± 0.14 ^h
红豆越橘	2.83 ± 0.21 ^a	0.99 ± 0.07 ^c	104.33 ± 0.71 ^c
蓝靛果	2.42 ± 0.14 ^b	2.09 ± 0.18 ^a	414.73 ± 0.83 ^a
红树莓	1.31 ± 0.06 ^c	0.82 ± 0.05 ^c	92.49 ± 0.76 ^d
软枣猕猴桃	0.52 ± 0.02 ^g	0.36 ± 0.02 ^g	6.19 ± 0.26 ^g

注: 数值以平均值 ± 标准差 (n=3) 表示, 每列不同小写字母表示有显著差异 (P<0.05)。

由表 2 可知, 9 种浆果的总酚、总黄酮和总花色苷含量存在显著差异 (P<0.05)。9 种浆果中总酚、总黄酮和总花色苷含量分别为 0.52~2.83 g GAE/100 g DW、0.36~2.09 g Rutin/100 g DW 和 2.14~414.73 mg/100 g DW。其中, 红豆越橘和蓝靛果的总酚含量均较高, 为 2.83 和 2.42 g GAE/100 g DW, 约为沙棘和软枣猕猴桃中总酚含量的 4 倍; 与 Bujor 等^[22]和 Xiao 等^[23]测定结果有明显差异, 造成这种差异的原因可能与种植环境、气候和成熟度有关。蓝靛果中总黄酮和总花色苷含量显著高于其他浆果品种, 沙棘和软枣猕猴桃中总黄酮和总花色苷含量显著低于其他品种。综合各项指标得出, 9 种东北浆果中, 蓝靛果含有的天然活性成分含量最高。

2.2 9 种浆果体外抗氧化活性比较

9 种东北浆果的 DPPH 自由基清除能力的 IC₅₀ 值和 ABTS⁺ 自由基清除能力的 IC₅₀ 值如图 1 和图 2 所示。

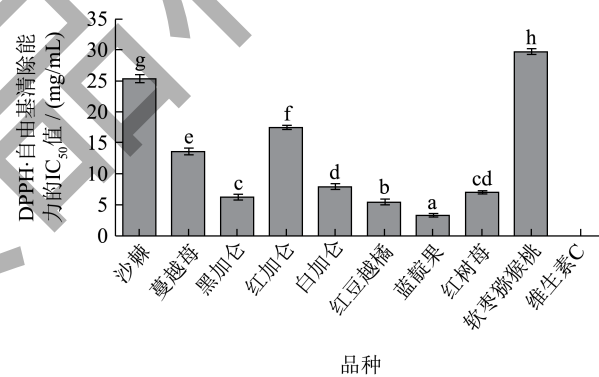


图 1 9 种东北浆果中 DPPH 自由基清除能力的 IC₅₀ 值

Fig.1 The IC₅₀ value of DPPH· free radical scavenging ability in 9 kinds of Northeast berries

注: 不同小写字母表示有显著差异 (P<0.05), 下同。

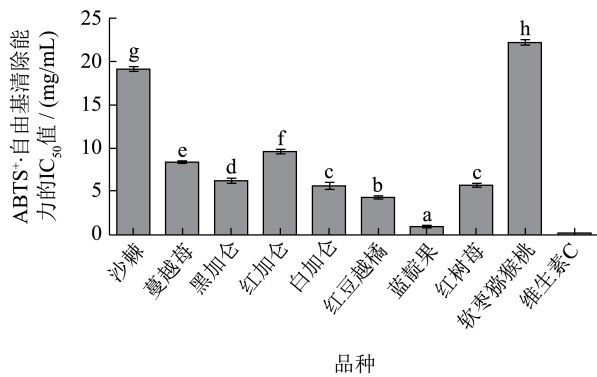


图 2 9 种东北浆果中 ABTS⁺ 自由基清除能力的 IC₅₀ 值
Fig.2 The IC₅₀ value of ABTS⁺ free radical scavenging ability in 9 kinds of Northeast berries

由图 1 和图 2 可知，不同品种浆果均表现出良好的抗氧化活性，9 种浆果的 DPPH· 自由基清除能力和 ABTS⁺ 自由基清除能力的 IC₅₀ 值分别为 3.33~29.55 mg/mL 和 0.96~22.22 mg/mL，相较于 DPPH 自由基清除能力，9 种东北浆果具有更高的 ABTS⁺ 自由基清除能力，这可能由于两种测定方法的适用系统不同^[24]。其中，活性物质含量高的红豆越橘和蓝靛果的 DPPH· 和 ABTS⁺ 自由基清除能力的 IC₅₀ 值均显著低于其他浆果，表明二者具有较强的抗氧化能力。其次，黑加仑、白加仑和红树莓也具有较低的 DPPH· 和 ABTS⁺ 自由基清除能力的 IC₅₀ 值。而沙棘和软枣猕猴桃的 DPPH· 和 ABTS⁺ 自由基清除能力的 IC₅₀ 值远高于其他品种，表明二者抗氧化能力较弱。

2.3 9 种浆果抗炎活性比较

9 种东北浆果的透明质酸酶抑制能力的 IC₅₀ 值和抑制白蛋白变性能力的 IC₅₀ 值如图 3 和图 4 所示。

由图 3 和图 4 可知，不同品种浆果均具有良好的抑制透明质酸酶和白蛋白变性的能力，以双氯芬酸钠为阳性对照，9 种浆果抑制透明质酸酶能力的 IC₅₀ 值和抑制白蛋白变性的 IC₅₀ 值分别为 4.28~20.20 mg/mL 和 5.99~20.55 mg/mL。其中，红豆越橘和蓝靛果透明质酸酶抑制能力和白蛋白变性抑制能力的 IC₅₀ 值最低，二者之间没有显著差异 ($P > 0.05$)，说明二者具有较优的抗炎能力，这可能由于其含有丰富的酚类物质对抗炎具有关键作用^[25]。沙棘、蔓越莓、红加仑和软枣猕猴桃抑制透明质酸酶和抑制白蛋白变性能力的 IC₅₀ 值远高于其他品种，表明四种浆果的抗炎活性较弱。

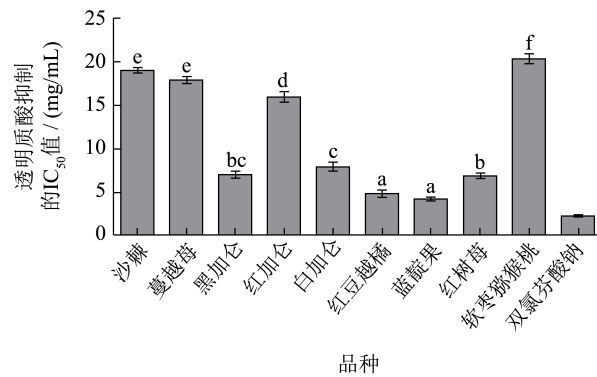


图 3 9 种东北浆果中透明质酸酶抑制能力的 IC₅₀ 值
Fig.3 The IC₅₀ value of hyaluronidase inhibition ability in 9 kinds of Northeast berries

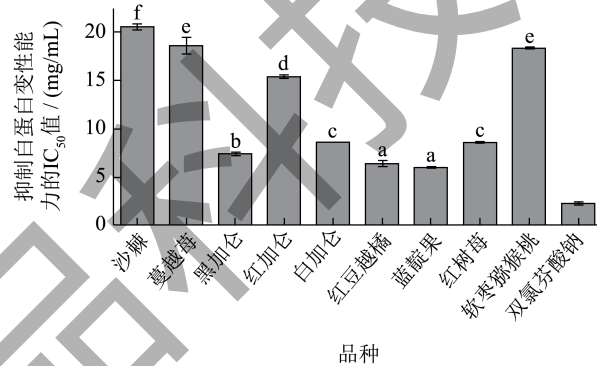


图 4 9 种东北浆果中白蛋白变性抑制能力的 IC₅₀ 值
Fig.4 The IC₅₀ value of albumin denaturation inhibition ability in 9 kinds of Northeast berries

2.4 相关性分析

9 种东北浆果中生物活性物质和抗氧化、抗炎活性之间的相关性分析如图 5 所示。

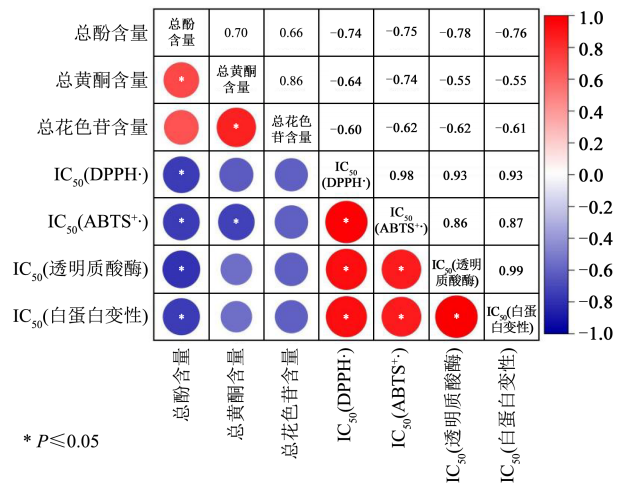


图 5 9 种东北浆果中生物活性成分和抗氧化活性、抗炎活性的相关性

Fig.5 Correlation of bioactive components, antioxidant activities and anti-inflammatory activities in 9 kinds of Northeast berries

表 3 9种东北浆果中酚类单体含量

Table 3 Contents of phenolic monomer in 9 kinds of Northeast berries

酚类单体/ (mg/g DW)	沙棘	蔓越莓	黑加仑	红加仑	白加仑	红豆越橘	蓝靛果	红树莓	软枣猕猴桃
没食子酸	0.03 ± 0.01 ^d	—	0.04 ± 0.00 ^d	—	0.08 ± 0.00 ^a	—	0.05 ± 0.00 ^c	0.07 ± 0.00 ^b	—
鞣花酸	—	—	—	—	—	—	0.20 ± 0.00 ^a	0.24 ± 0.00 ^a	—
绿原酸	0.10 ± 0.00 ^c	0.22 ± 0.00 ^d	0.08 ± 0.00 ^{ef}	0.09 ± 0.00 ^{ef}	0.08 ± 0.00 ^{ef}	1.73 ± 0.01 ^b	4.85 ± 0.02 ^a	1.19 ± 0.03 ^c	0.07 ± 0.00 ^{ef}
隐绿原酸	0.16 ± 0.01 ^f	0.40 ± 0.01 ^d	0.21 ± 0.01 ^e	0.68 ± 0.02 ^c	0.67 ± 0.02 ^c	1.83 ± 0.03 ^b	3.21 ± 0.03 ^a	0.23 ± 0.01 ^c	0.32 ± 0.00 ^{de}
新绿原酸	0.04 ± 0.00 ^c	0.04 ± 0.00 ^c	0.41 ± 0.01 ^e	0.32 ± 0.00 ^d	0.01 ± 0.00 ^c	0.76 ± 0.02 ^b	—	0.88 ± 0.01 ^a	—
龙胆酸	0.98 ± 0.03 ^c	—	—	—	0.53 ± 0.01 ^d	1.15 ± 0.01 ^b	6.90 ± 0.07 ^a	—	—
对羟基 苯甲酸	—	0.10 ± 0.00 ^b	—	—	—	1.31 ± 0.01 ^a	—	0.04 ± 0.00 ^c	—
咖啡酸	—	0.18 ± 0.01 ^b	—	—	0.01 ± 0.00 ^c	0.32 ± 0.01 ^a	—	0.01 ± 0.00 ^c	0.01 ± 0.00 ^c
对香豆酸	0.02 ± 0.00 ^c	0.03 ± 0.01 ^d	0.01 ± 0.00 ^f	0.03 ± 0.00 ^d	0.02 ± 0.00 ^c	0.21 ± 0.01 ^a	0.08 ± 0.00 ^b	0.04 ± 0.00 ^c	—
芥子酸	0.39 ± 0.00 ^c	0.82 ± 0.02 ^c	0.39 ± 0.00 ^e	0.43 ± 0.00 ^{de}	0.48 ± 0.00 ^d	3.79 ± 0.06 ^a	1.51 ± 0.04 ^b	—	—
丁香酸	—	—	—	0.10 ± 0.00 ^b	0.14 ± 0.00 ^a	—	—	0.02 ± 0.00 ^c	—
熊果苷	0.08 ± 0.00 ^g	0.07 ± 0.00 ^g	0.30 ± 0.01 ^e	0.49 ± 0.00 ^b	0.46 ± 0.01 ^c	0.28 ± 0.01 ^c	0.53 ± 0.00 ^a	0.36 ± 0.01 ^d	0.11 ± 0.00 ^f
儿茶素	—	—	0.10 ± 0.01 ^e	0.11 ± 0.01 ^c	0.29 ± 0.01 ^b	0.53 ± 0.00 ^a	—	—	—
表儿茶素	—	—	0.02 ± 0.00 ^b	—	—	1.05 ± 0.00 ^a	—	—	—
芦丁	0.26 ± 0.01 ^d	0.32 ± 0.00 ^c	0.07 ± 0.00 ^e	0.06 ± 0.00 ^{ef}	0.07 ± 0.00 ^c	0.35 ± 0.00 ^b	0.63 ± 0.00 ^a	0.05 ± 0.00 ^f	—
槲皮素	0.01 ± 0.00 ^c	0.04 ± 0.00 ^b	—	—	—	0.17 ± 0.01 ^a	0.02 ± 0.00 ^c	—	—
槲皮苷	0.48 ± 0.01 ^a	—	—	—	—	0.12 ± 0.00 ^b	0.03 ± 0.00 ^c	—	—
黄芩素	0.03 ± 0.00 ^d	0.05 ± 0.00 ^c	0.04 ± 0.00 ^e	0.04 ± 0.00 ^c	0.05 ± 0.00 ^c	0.06 ± 0.00 ^b	0.04 ± 0.00 ^c	0.06 ± 0.01 ^b	0.11 ± 0.00 ^a
树莓酮	—	0.08 ± 0.00 ^a	—	—	—	—	—	0.04 ± 0.00 ^b	—

注：—：表示未检测到；数值以平均值 ± 标准差 ($n=3$) 表示，每行不同小写字母表示有显著差异 ($P<0.05$)。

由图 5 可知，浆果中生物活性物质含量与抗氧化活性、抗炎活性之间具有良好的相关性。总酚含量与 DPPH 自由基清除能力、ABTS⁺ 自由基清除能力、透明质酸酶抑制能力和白蛋白变性抑制能力的 IC₅₀ 值均呈显著负相关，相关系数分别为 -0.74、-0.75、-0.78 和 -0.76 ($P\leq 0.05$)；总黄酮含量、总花色苷含量与 DPPH 自由基清除能力、ABTS⁺ 自由基清除能力、透明质酸酶抑制能力和白蛋白变性抑制能力的 IC₅₀ 值均呈负相关，但相关系数较低，表明相较于总黄酮和总花色苷含量，浆果中总酚含量可能决定抗氧化能力和抗炎能力^[26,27]。浆果的抗氧化活性与抗炎活性之间存在着较强的正相关，表明浆果中抗氧化活性越强，其抗炎活性也越强。9 种浆果均显示出良好的抗氧化能力，因此，食用这些浆果可能会有助于预防或降低与氧化应激相关的炎症风险^[28]。

2.5 9种浆果中酚类单体比较

浆果中总酚含量对抗氧化和抗炎活性影响较大，故进一步对浆果中酚类单体的种类和含量进行鉴定和定量分析。9 种东北浆果中酚类单体含量如表 3 所示。

由表 3 可知，通过 HPLC 在 9 种浆果中鉴定并定量 19 种酚类单体，包括 11 种酚酸、7 种黄酮类化合物和 1 种芳香族化合物，分别为没食子酸、鞣花酸、绿原酸、隐绿原酸、新绿原酸、龙胆酸、对羟基苯甲酸、咖啡酸、对香豆酸、芥子酸、丁香酸、熊果苷、儿茶素、表儿茶素、芦丁、槲皮素、槲皮苷、黄芩素和树莓酮。浆果中酚类单体的含量和种类因品种不同而具有明显差异。其中，红豆越橘和蓝靛果量化多酚单体的总含量较高，分别为 13.48 和 17.95 mg/g·DW。9 种浆果中均含有绿原酸、隐绿原酸、熊果苷和黄芩素，含量分别为 0.07~4.85、0.16~3.21、0.07~0.53

和 0.03~0.11 mg/g DW, 绿原酸和隐绿原酸也是大部分浆果中主要的酚类单体, 这可能有利于浆果的抗氧化和抗炎活性^[29]。红豆越橘中酚类单体种类最多, 为 15 种, 主要为绿原酸、隐绿原酸和芥子酸。软枣猕猴桃中检测的酚类单体种类最少, 仅检测出 5 种酚类单体。鞣花酸、表儿茶素和树莓酮仅在少数浆果中检测鉴定出。

2.6 讨论

浆果是生物活性物质的丰富来源, 本研究结果表明, 9 种东北浆果中均含有较高的多酚化合物, 如酚酸、类黄酮和花色苷等, 其中, 蓝靛果、红豆越橘和黑加仑中总酚和总花色苷含量较高, 蔓越莓、红加仑和白加仑中总黄酮含量较高。研究表明, 浆果中的酚酸、黄酮类化合物和花青素具有潜在的健康益处, 浆果中酚酸如没食子酸和绿原酸可显著上调抗氧化基因表达和减少促炎细胞因子的产生来保护小鼠肝损伤, 可用于改善肝脏方面的疾病^[30,31]; 黄酮类化合物如熊果苷和芦丁能够有效降低小鼠关节软骨和血管中的炎症风险和氧化应激程度, 可作为骨关节炎的治疗剂^[32,33]; 花青素可通过降低活性氧显著改善心血管疾病、糖尿病和癌症^[34]。因此, 9 种浆果因良好的抗氧化和抗炎活性使其具有改善心血管、肝脏和骨关节等疾病的功效。

本研究结果表明, 9 种东北浆果中均含有较高的生物活性物质, 特别是没食子酸、绿原酸、隐绿原酸、熊果苷和芦丁等具有预防和改善氧化应激、炎症的功效。浆果提取物可作为有效的功能成分应用于开发多种功能性食品、保健食品和医药领域。Khan 等^[35]通过临床试验研究发现摄入低热量高多酚的黑加仑饮料后可有效减少氧化应激并改善内皮功能, 这是由于其花青素通过植物雌激素活性显著提高了人内皮细胞中一氧化氮合酶 mRNA 的表达和一氧化氮合成, 从而促进血管健康^[36]。Wu 等^[37]研究发现红树莓提取物能通过丝裂原活化蛋白激酶 (MAPK) 级联反应、激活核因子-红细胞 2 相关因子 2 (Nrf2) / 血红素加氧酶 1 (HO-1) 级联反应和刺激过氧化物酶体增殖物激活受体- γ (PPAR- γ) 的表达能够有效降低氧化应激并抑制肝星状细胞的活化, 从而预防肝纤维化和慢性肝病。Wu 等^[38]研究发现蓝靛果提取物可以通过抑制促炎因子的释放和增加抗氧化酶的表达来减轻关节炎, 此外, 还可以通过降低血清转氨酶水平来减轻完全弗氏佐剂 (CFA) 引起的肝损伤。因此, 生物活性物质含量

较高的蓝靛果、红豆越橘、黑加仑、蔓越莓和红树莓, 其提取物不仅可以用于开发具有护肝、预防关节炎和心血管疾病等功效的口服液、口含片, 也可以作为有效的功能成分应用于医药领域。而沙棘和软枣猕猴桃中生物活性物质含量较低, 除作为膳食补充剂外, 也可作为调味剂与其他浆果共同复合加工成其他产品^[39]。

浆果的高抗氧化和抗炎能力与多酚直接相关, 在对浆果加工过程中, 温度可能会影响总酚和单体酚变化, 有研究表明, 热处理会降低浆果中酚类物质的含量, 特别是在果汁生产中^[40], 因此, 在加工过程中应尽量选择适当的食品加工技术, 如微波辅助技术、高压辅助冷冻技术、高压二氧化碳处理技术和超声技术等, 以防止或减少酶促褐变和非酶促褐变引起的多酚降解^[41], 从而提高浆果中多酚的生物利用率。

综上所述, 9 种东北浆果因其含有丰富的生物活性物质和具有良好的抗氧化、抗炎活性, 不仅可以作为膳食补充剂用于生产保健品、营养品等具有特定功效的产品, 还可以作为预防和治疗各类疾病的药物制剂应用于医疗领域, 具有较高的食用和药用价值。

3 结论

本研究通过对沙棘、蔓越莓、黑加仑、红加仑、白加仑、红豆越橘、蓝靛果、红树莓和软枣猕猴桃中生物活性物质、抗氧化和抗炎活性进行测定分析, 证实了浆果中总酚含量与抗氧化、抗炎活性之间存在良好的相关性, 总酚含量越多, 浆果抗氧化和抗炎活性越强。9 种东北浆果中, 红豆越橘和蓝靛果中活性物质含量远高于其他浆果品种, 且抗氧化和抗炎能力较强。本研究结果可有助于选择具有丰富活性物质和最优功能活性的东北浆果, 作为优质原料应用于膳食补充剂、保健食品和功能性食品的研发。

参考文献

- [1] FENG C Y, SU S, WANG L J, et al. Antioxidant capacities and anthocyanin characteristics of the black-red wild berries obtained in Northeast China [J]. Food Chemistry, 2016, 204(1): 150-158.
- [2] WU T, ZHU W Y, CHEN L Y, et al. A review of natural plant extracts in beverages: Extraction process, nutritional function, and safety evaluation [J]. Food Research

- International, 2023, 172: 113158.
- [3] JANA O, IRENA H, LADISLAVA M, et al. Contribution of phenolic compounds, ascorbic acid and vitamin E to antioxidant activity of currant (*Ribes L.*) and gooseberry (*Ribes uva-crispa L.*) fruits [J]. Food Chemistry, 2019, 284: 323-333.
- [4] LINARDS K, MARCIS M, VIZMA N, et al. Composition, sun protective and antimicrobial activity of lipophilic bilberry (*Vaccinium myrtillus L.*) and lingonberry (*Vaccinium vitis-idaea L.*) extract fractions [J]. LWT, 2021, 138: 110784.
- [5] ZHANG M, MA X M, XIAO Z, et al. Polyphenols in twenty cultivars of blue honeysuckle (*Lonicera caerulea L.*): Profiling, antioxidant capacity, and α -amylase inhibitory activity [J]. Food Chemistry, 2023, 421: 136148.
- [6] 刘振华,董琦,王洪伦,等.沙棘黄酮类成分及其药理作用的研究进展[J].中国药物化学杂志,2023,33(8):598-617.
- [7] 唐艺宁,田密霞,李奕莹,等.软枣猕猴桃的开发利用研究进展[J].保鲜与加工,2023,23(8):76-80.
- [8] CECILIA J L, MARÍA F C, PAULA G O, et al. Agriculture waste valorisation as a source of antioxidant phenolic compounds within a circular and sustainable bioeconomy [J]. Food & Function, 2020, 11(6): 4853-4877.
- [9] ZGANG M Q, ZHANG J, ZHANG Y T, et al. The link between the phenolic composition and the antioxidant activity in different small berries: A metabolomic approach [J]. LWT, 2023, 182: 114853.
- [10] NORA P, MARINA F, LUCIANA A, et al. Berry polyphenols and human health: evidence of antioxidant, anti-inflammatory, microbiota modulation, and cell-protecting effects [J]. Current Opinion in Food Science, 2021, 42: 167-186.
- [11] YU Y P, YANG G, WANG J L, et al. Comprehensive evaluation of 24 red raspberry varieties in northeast China based on nutrition and taste [J]. Foods, 2022, 11(20): 3232.
- [12] 陈蓬凤,梅新,黄师荣,等.不同品种薯尖的总酚、总黄酮含量及抗氧化活性比较[J].现代食品科技,2021,37(3): 132-138,15.
- [13] TAN S, LAN X, CHEN S, et al. Physical character, total polyphenols, anthocyanin profile and antioxidant activity of red cabbage as affected by five processing methods [J]. Food Research International, 2023, 169: 112929.
- [14] 余平莲,俞媛瑞,张帮磊,等.马铃薯皮渣中总酚和单体酚的检测方法研究[J].中国食品添加剂,2022,33(6):157-165.
- [15] 李小连,黄松清,申伟培,等.基于高效液相色谱法同步测定药对大黄-黄芪胶囊主要蒽醌类成分的含量[J].广西医学,2023,45(21):2617-2621.
- [16] 张社利,王保安,范云场.高效液相色谱法测定茶饮料中的黄酮类化合物[J].化学研究与应用,2015,27(6):895-898.
- [17] 马艳妮,李智宁,王韬,等.超高效液相色谱法测定忍冬叶中5种黄酮成分[J].江苏农业科学,2020,48(7):226-229.
- [18] AMIR M, NESRIN Ö, EZGI A S, et al. Structure-antiradical activity relationships of 25 natural antioxidant phenolic compounds from different classes [J]. Heliyon, 2022, 8(9): 10467.
- [19] QI Y Y, XIE L Y, DENG Z Y, et al. Stability and antioxidant activity of 10 isoflavones and anthocyanidins during *in vitro* digestion [J]. Food Bioscience, 2023, 56: 103189.
- [20] SACHINDRA P, SHIROMA H, JAGATHPRIYA W, et al. *In vitro* anti-inflammatory and anti-oxidant activities of Sri Lankan medicinal plants [J]. Industrial Crops Products, 2016, 94: 610-620.
- [21] ASHUTOSH G, RAMESH K, RISHA G, et al. Antioxidant, anti-inflammatory and hepatoprotective activities of *Terminalia bellirica* and its bioactive component ellagic acid against diclofenac induced oxidative stress and hepatotoxicity [J]. Toxicology Reports. 2021, 8: 44-52.
- [22] OANA-CRINA B, CHRISTIAN G, CLAIRE D, et al. Phenolic compounds and antioxidant activity of lingonberry (*Vaccinium vitis-idaea L.*) leaf, stem and fruit at different harvest periods [J]. Food Chemistry, 2018, 252: 356-365.
- [23] XIAO Z, LI D L, HUANG D J, et al. Non-extractable polyphenols from blue honeysuckle fruit pomace with strong antioxidant capacity: Extraction, characterization, and their antioxidant capacity [J]. Food Research International, 2023, 174: 113495.
- [24] ANNA F, DAE-OK K, SANG-JIN C, et al. Comparison of ABTS/DPPH assays to measure antioxidant capacity in popular antioxidant-rich US foods [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2011, 24(7): 1043-1048.
- [25] NIMA M, GUO Y Y, WANG K, et al. Macroporous resin purification of phenolics from Irish apple pomace: Chemical characterization, and cellular antioxidant and anti-inflammatory activities [J]. Food Chemistry, 2024, 437: 137815.
- [26] 王婷婷,苑伟,李华,等.复合小浆果果酒中的酚类物质及其抗氧化活性分析[J].食品与发酵工业,2019,45(3):183-188.
- [27] DU G A, QING Y D, WANG H Z, et al. Effects of Tibetan kefir grain fermentation on the physicochemical properties, phenolics, enzyme activity, and antioxidant activity of *Lycium barbarum* (Goji berry) juice [J]. Food Bioscience, 2023, 53: 102555.
- [28] CHEN J B, SHU Y C, CHEN Y H, et al. Evaluation of antioxidant capacity and gut microbiota modulatory effects of different kinds of berries [J]. Antioxidants, 2022, 11(5): 1020.

- [29] LI J, WANG S P, WANG Y Q, et al. Comparative metabolism study on chlorogenic acid, cryptochlorogenic acid and neochlorogenic acid using UHPLC-Q-TOF MS coupled with network pharmacology [J]. Chinese Journal of Natural Medicines, 2021, 19(3): 212-224.
- [30] JEABURU S I, ORIAKHI K. Hepatoprotective, antioxidant and, anti-inflammatory potentials of gallic acid in carbon tetrachloride-induced hepatic damage in Wistar rats [J]. Toxicology Reports, 2021, 8: 177-185.
- [31] CHEN K, NIU J Y, ZHANG J Y, et al. Hepatoprotective effects of chlorogenic acid on mice exposed to aflatoxin B1: Modulation of oxidative stress and inflammation [J]. Toxicon, 2023, 231: 107177.
- [32] JIN J L, LIU Y, JIANG C, et al. Arbutin-modified microspheres prevent osteoarthritis progression by mobilizing local anti-inflammatory and antioxidant responses [J]. Materials Today Bio, 2022, 16: 100370.
- [33] WONHWA L, SAE W K, JONG S B, Barrier protective effects of rutin in LPS-induced inflammation *in vitro* and *in vivo* [J]. Food and Chemical Toxicology, 2012, 50(9): 3048-3055.
- [34] AKHUNZADA B, MUHAMMAD I, ABDUL Q, et al. A review of the bioactive ingredients of berries and their applications in curing diseases [J]. Food Bioscience, 2021, 44: 101407.
- [35] FAISEL K, SUMANTRA R, ANGELA M C, et al. Lowering of oxidative stress improves endothelial function in healthy subjects with habitually low intake of fruit and vegetables: A randomized controlled trial of antioxidant- and polyphenol-rich blackcurrant juice [J]. Free Radical Biology and Medicine, 2014, 72: 232-237.
- [36] KAYO H, NAOKI N, HAYATO M. Phytoestrogenic effects of blackcurrant anthocyanins increased endothelial nitric oxide synthase (eNOS) expression in human endothelial cells and ovariectomized Rats [J]. Molecules, 2019, 24(7): 1259.
- [37] WU T H, WANG P W, LIN T Y, et al. Antioxidant properties of red raspberry extract alleviate hepatic fibrosis via inducing apoptosis and transdifferentiation of activated hepatic stellate cells [J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2021, 144: 112284.
- [38] WU S S, HE X, WU X S, et al. Inhibitory effects of blue honeysuckle (*Lonicera caerulea* L.) on adjuvant-induced arthritis in rats: Crosstalk of anti-inflammatory and antioxidant effects [J]. Journal of Functional Foods, 2015, 17: 514-523.
- [39] CHEN A H, FENG X W, BYANBASUREN D, et al. Traditional food, modern food and nutritional value of Sea buckthorn (*Hippophae rhamnoides* L.): a review [J]. Journal of Future Foods, 2023, 3(3): 191-205.
- [40] HAWI D, MIN L, MARIO G F. Processing influences on food polyphenol profiles and biological activity [J]. Current Opinion in Food Science, 2020, 32: 90-102.
- [41] NORA P, MARINA F, LUCIANA A, et al. Berry polyphenols and human health: evidence of antioxidant, anti-inflammatory, microbiota modulation, and cell-protecting effects [J]. Current Opinion in Food Science, 2021, 42: 167-186.