

模拟物流对不同浆果提取物抗氧化活性变化的影响

肖淦泓¹, 王敏¹, 侯传丽¹, 廖林锋¹, 张颖², 任娇艳^{1,3*}

(1. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510641)

(2. 无限极(中国)有限公司, 广东广州 510665) (3. 中新国际联合研究院, 广东广州 510405)

摘要: 该研究旨在探究在模拟物流条件下蓝莓、树莓和接骨木莓提取物多酚含量及其抗氧化活性的变化, 采用循环变温法模拟陆地物流运输条件[30 °C (7 h) → 35 °C (6 h) → 45 °C (5 h) → 55 °C (5 h) → 60 °C (1 h) → 30 °C (7 h)], Folin 酚法测定不同物流时间下浆果提取物多酚含量, 2,2-联苯基-1-苦基胍基 (2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl, DPPH·) 清除活性和氧自由基吸收能力 (Oxygen Radical Absorbance Capacity, ORAC) 评价不同物流时间下浆果提取物抗氧化活性的变化。结果表明, 接骨木莓提取物、蓝莓提取物和树莓提取物初始多酚质量分数分别为 14.96%、5.11% 和 2.53%, 随着循环时间的积累, 仅接骨木莓提取物多酚含量显著升高; 三者 DPPH· 清除活性均降低, 总 IC₅₀ 增长率均超过 20%; 接骨木莓提取物、树莓提取物和蓝莓提取物 ORAC 波动较大, 其 Trolox 当量分别下降 62.76%、32.74% 和 19.72%。模拟物流温度变化与时间积累会影响蓝莓提取物、树莓提取物和接骨木莓提取物抗氧化活性, DPPH· 清除活性稳定性依次为树莓<蓝莓<接骨木莓, ORAC 稳定性依次为蓝莓<接骨木莓<树莓。

关键词: 模拟物流; 多酚含量; 2,2-联苯基-1-苦基胍基 (DPPH·) 清除活性; 氧自由基清除能力 (ORAC)

文章编号: 1673-9078(2022)10-235-241

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.10.1385

Effects of Logistics on the Antioxidant Activities of Different Berry Extracts: A Simulation Study

XIAO Ganhong¹, WANG Min¹, HOU Chuanli¹, LIAO Linfeng¹, ZHANG Ying², REN Jiaoyan^{1,3*}

(1. School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

(2. Infinitus (China) Co. Ltd., Guangzhou 510665, China)

(3. China-Singapore International Joint Research Institute, Guangzhou 510405, China)

Abstract: A cyclic temperature change model was used to simulate land transportation conditions [30 °C (7 h) → 35 °C (6 h) → 45 °C (5 h) → 55 °C (5 h) → 60 °C (1 h) → 30 °C (7 h)] to investigate the effects of logistics and transportation on the polyphenol contents and antioxidant activities of blueberry, raspberry, and elderberry extracts. The folin-phenol method was used to determine the polyphenol contents in the three berry extracts under different transportation times. Additionally, the 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) scavenging activity and oxygen radical absorption capacity (ORAC) were used to evaluate the antioxidant activities of the three extracts under different transportation times. The results demonstrate that the initial polyphenol contents of the elderberry, blueberry, and raspberry extracts were 14.96%, 5.11%, and 2.53%, respectively. As the transportation time increased, only the polyphenol content of the elderberry extract increased significantly. Over time, the DPPH· scavenging activities and ORAC of all the three extracts decreased, and the total increased rates of IC₅₀ were all higher than 20%. It is worth noting that the ORAC for all three extracts showed remarkable fluctuations. The total trolox equivalent loss rates of the elderberry, raspberry, and blueberry extracts were 62.76%, 32.74% and 19.72% respectively. The temperature changes and transportation duration times under logistics simulation affected the antioxidant activities of all three berry extracts. The stabilities of the DPPH scavenging activities in

引文格式:

肖淦泓,王敏,侯传丽,等.模拟物流对不同浆果提取物抗氧化活性变化的影响[J].现代食品科技,2022,38(10):235-241

XIAO Ganhong, WANG Min, HOU Chuanli, et al. Effects of logistics on the antioxidant activities of different berry extracts: a simulation study [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(10): 235-241

收稿日期: 2021-12-09

基金项目: 广东省国际科技合作项目专题 (2022A0505050012); “一带一路”创新人才交流外国专家项目 (DL2022163004L)

作者简介: 肖淦泓 (1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品营养与健康, E-mail: 1615441719@qq.com

通讯作者: 任娇艳 (1980-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品营养与健康, E-mail: jyren@scut.edu.cn

ascending order were: raspberry < blueberry < elderberry, while the stabilities of ORAC was blueberry < elderberry < raspberry.

Key words: logistics simulation; polyphenol content; 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH·) scavenging activity; oxygen radical absorbance capacity (ORAC)

浆果(如蓝莓、树莓、接骨木莓等)富含多酚类物质,具有经济价值高、风味独特、营养价值高等优点。研究报道浆果具有抗菌、抗炎、抗病毒、促进血管张力等生物活性^[1],而多酚类物质(如花色苷类、黄酮醇类、酚酸类等)是发挥其生物活性的主要成分之一^[2,3]。由于多酚类化合物性质活泼,因此在加工、贮藏和物流运输过程中,浆果易受温度、氧气和光照等因素影响而造成其所含多酚类物质含量损失或生物活性降低等问题^[4,5]。比如,多酚结构中的酚羟基易发生自氧化反应,产生过氧化物,使多酚含量降低,生物活性下降。多酚芳香环上的极性取代基的数量和位置均会影响其化学性质。环上羟基的存在使花青素在酸性溶液中带正电荷,过多的羟基会降低花青素分子的稳定性^[6];温度是影响多酚稳定性的重要因素之一,在较高温度储存时,多酚会发生水解、氧化等反应,直接导致其结构的变化^[4];光对于植物多酚的生物合成至关重要,但也会加速其降解,黑暗环境下储存对多酚具有保护作用。此外,在不同贮藏条件下,环境温度改变对不同浆果总多酚含量和抗氧化活性均有不同程度降低^[7]。

浆果在物流过程中,尤其是陆运,面临着温度高、运输久、颠簸震荡等问题。在阳光照射充足的条件下,夏季路面温度比气温高 10~20 °C,最高可达 55 °C 以上^[8]。由于不同材质的厢体导热性不同,非冷链运输车厢内温度随着陆运时间增加而上升的趋势也不同,物料温度亦随之上升,这将直接影响浆果产品的活性成分。通常采用冷链运输、气调保藏、添加蓄冷剂等方法以解决厢体内高温问题。实际公路运输中,白天的热量不断积累,根据企业提供的监测数据显示,00:00 a.m.至 7:00 a.m.车厢内温度上升速率较低,约 0.7 °C/h; 7:00 a.m.至 6:00 p.m.随着阳光照射强度增加,车厢内温度上升速率加快,约 2.0 °C/h; 6:00 p.m.至 12:00 p.m.光照减弱但车厢内热量无法传递至厢外,导致车厢内温度仍在持续上升,但速率放缓,约 1.0 °C/h。

浆果提取物作为功能性食品市场的重要原料,目前运输过程对其功能成分含量及活性的影响尚不明晰^[8],且大多数研究对象为浆果鲜果而非已加工产品。因此,本研究探究在模拟夏季公路运输条件下,蓝莓、树莓和接骨木莓的提取物总多酚含量和体外抗氧化活性变化,为未来相关功能食品开发及物流运输条件的

优化提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 原料与试剂

蓝莓提取物、树莓提取物和接骨木莓提取物均由无限极(中国)有限公司提供。没食子酸标准品、无水乙醇、磷酸氢二钾,天津市大茂化学试剂厂;碳酸钠,广州化学试剂厂;水溶性维生素 E (Trolox)、2,2'-偶氮二异丁基脒二盐酸盐(2,2'-Azobis(2-amidinopropane)dihydrochloride, AAPH), Sigma-Aldrich 美国,纯度≥97%; 1,1-二苯基-2-苦肼基(2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl, DPPH·),纯度为 96%,上海麦克林生化科技有限公司;福林酚,上海源叶生物科技有限公司。以上试剂如无特殊说明均为 AR 级,实验用水均为去离子水。

1.2 主要仪器设备

Binder KB240 型低温恒温箱,宾德环境试验设备(上海)有限公司; Synergy H1 型多功能微孔板检测酶标仪,美国 BioTek 公司; Model 752 型紫外分光光度计,上海现科分光仪器有限公司; EXD-622B 型电子天平,福州华科电子仪器有限公司; XW-80A 型涡旋混合器,海门市其林贝尔仪器制造有限公司; PHS-3C 型 pH 计,雷磁上海仪电科学仪器有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 模拟物流实验

本实验模拟非冷链夏季公路运输的温度变化和时间积累,准确称取 2 g 样品粉末于棕色 EP 管中,并置于 Binder KB240 型低温恒温箱中,经过 30 °C (7 h) → 35 °C (6 h) → 45 °C (5 h) → 55 °C (5 h) → 60 °C (1 h) → 30 °C (进入新循环)共计 24 h 循环模拟物流条件,并分别在第 0、24、48 和 72 h 取出样品粉末,每组样品设置三个平行。待样品温度降至室温后置于 4 °C 冰箱中贮存,以待后续检测使用。本实验中温度和时间参数均依据非冷链物流实际经验参数设置,以模拟在夏季夜间与白天公路运输的实际车厢温度变化(图 1)。

第一阶段:模拟夜间运输,温度恒定为 30 °C,持续时间 7 h;

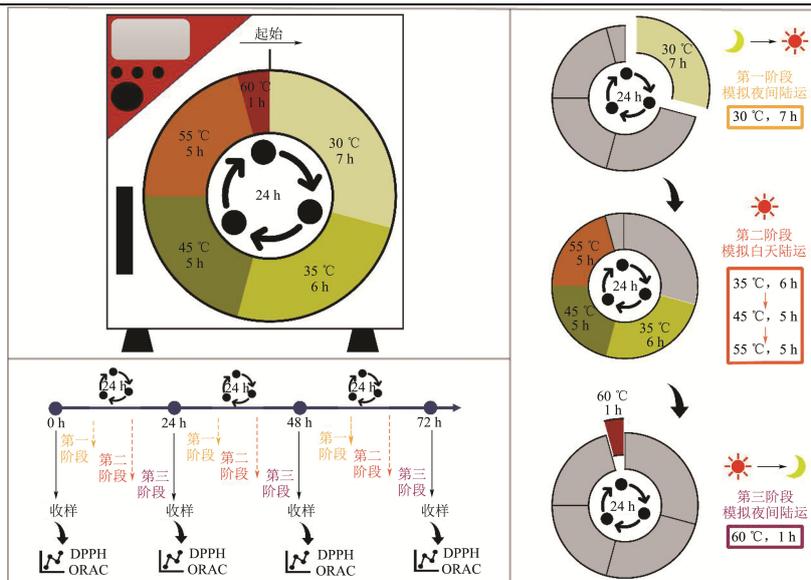


图1 模拟物流示意图

Fig.1 Schematic diagram of logistics simulation

第二阶段：模拟白天运输，温度变化和持续时间设置为 35 °C（6 h）→45 °C（5 h）→55 °C（5 h）；

第三阶段：模拟车厢隔热，经历白天后的热量积累且未能及时散热，温度恒定为 60 °C，持续时间 1 h，此后再进入下一周期的循环。

1.3.2 多酚含量测定

参考 GB/T 8313-2018 中福林酚法并稍作修改，测定样品多酚含量。

1.3.2.1 标准曲线绘制

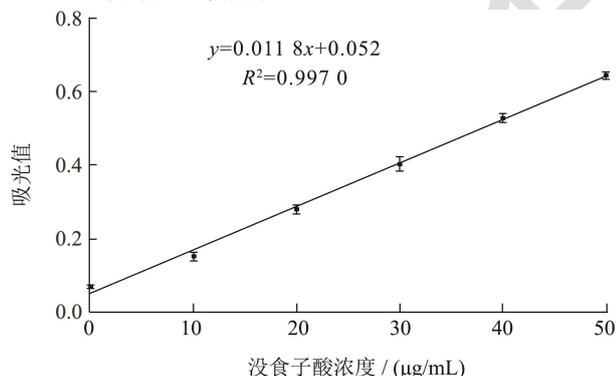


图2 没食子酸标准曲线

Fig.2 Gallic acid standard curve

没食子酸标准溶液配制：准确称取没食子酸粉末 10 mg 并配制浓度为 100 µg/mL 没食子酸标准溶液。将 100 µg/mL 的没食子酸标准溶液分别吸取 0、50、100、150、200、250 µL 于试管，再分别依次加入 500、450、400、350、300、250 µL 去离子水于对应试管中，得到 0、10、20、30、40、50 µg/mL 没食子酸标准溶液。向上述没食子酸标准溶液中分别加入 2.5 mL 福林酚，涡旋摇匀，室温反应 5 min 后立即加入 2 mL w=7.5% Na₂CO₃ 溶液，涡旋摇匀，室温静置 60 min。在 765 nm

处测定标准溶液吸光值，记录数据。以上实验均避光进行。

以没食子酸为标准品，得到线性回归方程 $y=0.0118x+0.052$ ($R^2=0.9970$)，表明没食子酸浓度在 0~50 µg/mL 范围内与吸光度的线性关系良好（图 2）。

1.3.2.2 样品多酚含量测定

待测液配制：准确称取样品粉末 10 mg 并配制浓度为 5 mg/mL 样品溶液。吸取 50 µL 待测液于试管中，加入 450 µL 去离子水稀释得到浓度为 0.5 mg/mL 待测液。分别向上述待测液中加入 2.5 mL 福林酚，涡旋摇匀，室温反应 5 min 后立即加入 2 mL w=7.5% Na₂CO₃ 溶液，涡旋摇匀，室温静置 60 min。在 765 nm 处测定待测液吸光值，记录数据。以上实验均在避光条件下进行。

样品多酚含量按式（1）计算：

$$Z = \frac{(C_1 - C_0) \times V_2}{V_1 \times C_Y} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

Z——多酚质量分数，%；

C₀——空白液浓度，µg/mL；

C₁——待测液浓度，µg/mL；

V₁——加入待测液于试管中的体积，本实验为 50 µL；

V₂——终体系的体积，本实验为 5 mL；

C_Y——样品溶液浓度，本实验为 5 mg/mL。

1.3.3 DPPH·清除率测定

参照文献^[9]，用 DPPH·清除率 IC₅₀ 值来表征提取物的抗氧化活性。A_i：取 2 mL 样品和 2 mL DPPH·溶液于试管；A_j：在试管中取 2 mL 样品和 2 mL 无水乙醇于试管；A_c：取 2 mL 无水乙醇和 2 mL DPPH·溶液

于试管。三组均振动 10 s, 在 37 °C 恒温箱中保温 30 min 后, 采用分光光度计测定样品 517 nm 处吸光值。按照式 (2) 计算 DPPH·清除率 (记为 F , %):

$$F = \left(1 - \frac{A_i - A_j}{A_c} \right) \times 100\% \quad (2)$$

1.3.4 氧自由基吸收能力 (ORAC) 测定

参照文献^[10]方法, 并稍作修改, 采用酶标仪检测样品荧光强度的变化, 实验步骤如下, 分别向 96 孔板中加入 20 μL 待测样品、Trolox (6.25、12.5、25、50 $\mu\text{mol/L}$) 标准液和磷酸缓冲工作液, 37 °C 孵育 10 min 后, 加入 200 μL Fluorescein 孵育 20 min, 其中对照组加入 20 μL 磷酸缓冲工作液, 其余每孔加入 20 μL AAPH, 检测 2 h 内反应液在 538 nm 处吸光值的变化。氧自由基清除能力 ORAC 值为通过相对荧光衰减曲线面积 S 的变化计算并以 Trolox 当量表示, 公式如下:

$$S = 0.5 \times [2 \times (F_0 + F_1 + \dots + F_{n-1} + F_n) - F_0 - F_n] \times \Delta t \quad (3)$$

$$Q = \frac{S_{\text{sample}} - S_{\text{blank}}}{S_{\text{Trolox}} - S_{\text{blank}}} \quad (4)$$

式中:

Q ——氧自由基清除能力 (ORAC);

S ——荧光淬灭曲线下面积;

Δt ——相邻两个时间点之间的时间间隔, s;

F_0, F_1, \dots, F_n ——分别表示淬灭曲线的微分。

1.3.5 数据处理

所有数据均为 3 次重复的平均值和标准差 (Means \pm SD), 图表由 Prism 8 分析绘制, 采用 SPSS 20.0 软件单因素方差分析方法对数据进行显著性检验和线性回归分析 ($p < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 模拟物流前后多酚含量变化

浆果果实中多酚类物质稳定性易受温度影响, 温度较高时, 多酚会发生水解、氧化等反应, 直接导致其结构变化及含量下降^[5]。为了分析蓝莓提取物、树莓提取物和接骨木莓提取物中多酚含量经模拟物流运输条件下的变化, 采用 Folin 酚法测定三者在不同物流循环时间下的多酚含量。模拟物流前 (第 0 d) 接骨木莓提取物、蓝莓提取物和树莓提取物多酚质量分数分别为 14.96%、5.11% 和 2.53%。然而, 对比模拟物流前后蓝莓提取物和树莓提取物的多酚含量, 发现二者均无显著性差异 ($p > 0.05$); 但接骨木莓提取物经模拟物流后 (第 3 d) 的多酚质量分数显著高于模拟物流前的多酚质量分数, 达到 17.03% ($p < 0.05$) (图 3)。三种浆果提取物多酚含量的变化可能由于结合态多酚

转变为游离态多酚, 导致三者间的差异^[11]。矫馨瑶等发现浆果果实多酚含量在 30 °C 时多酚保存率出现显著下降 ($p < 0.05$)^[5], 此现象与本文结果不同, 推测可能由于提取物的含水量极低, 降解反应较难发生, 导致浆果提取物多酚含量变化与浆果果实多酚含量变化间的差异。通过对数据库 Phenol-Explorer 3.6 (<http://phenol-explorer.eu/>)^[12]中有关接骨木莓、蓝莓和树莓多酚物质的汇总数据分析可知, 三者多酚含量分别为 1 358.66、307.02 和 203.50 mg/100 g, 其比例与本实验中采用福林酚法实际测得的接骨木莓提取物、蓝莓提取物和树莓提取物的多酚质量分数比例相近。

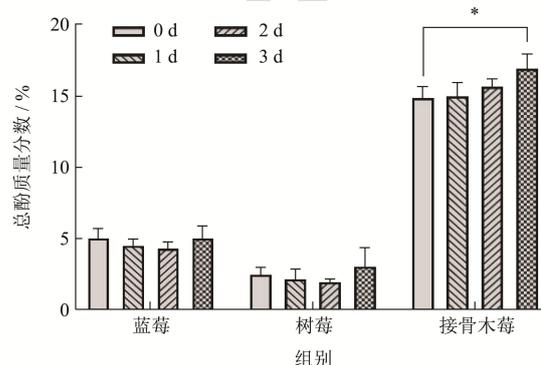


图 3 三种浆果提取物多酚含量

Fig.3 Total phenol content of three kinds of berry extract

注: 在模拟物流不同循环时间下蓝莓、树莓和接骨木莓提取物的多酚含量。

2.2 模拟物流前后 DPPH·清除活性变化

DPPH·清除率是体外评价多酚类物质抗氧化活性的常用手段之一^[13]。在第 0 天时三种提取物中 DPPH·半数清除浓度 IC_{50} 值大小顺序为树莓提取物 > 蓝莓提取物 > 接骨木莓提取物, 而三者的多酚含量恰好相反, 表明多酚含量越高, DPPH·清除活性越强。与第 0 天相比, 模拟物流后三种浆果多酚提取物的 IC_{50} 值在第 3 天显著升高 ($p < 0.05$) 且平均增长率均超过 20%, 蓝莓提取物 IC_{50} 值平均增长率最高, 达 63.32% (图 4a 和图 4b)。为进一步分析三种浆果多酚提取物模拟物流不同天数的 DPPH·清除活性变化, 分别将三种浆果提取物第 n 天的 IC_{50} 值与第 $n-1$ 天的 IC_{50} 值作差得到第 n 天 Δ_{DPPH} (图 4c)。在模拟物流第 1 天时三种浆果提取物 Δ_{DPPH} 均较低; 在模拟物流第 2 天时树莓提取物和蓝莓提取物 Δ_{DPPH} 均为正值 (分别为 973.33 $\mu\text{g/mL}$ 和 156.93 $\mu\text{g/mL}$), 而接骨木莓提取物 Δ_{DPPH} 趋近于 0; 在模拟物流第 3 天时蓝莓提取物 Δ_{DPPH} 明显升高, 而接骨木莓提取物 Δ_{DPPH} 仍较低。结果表明, 在模拟物流条件下, 三种浆果提取物 DPPH·清除活性稳定性依次为树莓提取物 < 蓝莓提取物 < 接骨木莓提

取物, 三者模拟物流第1天后 DPPH·清除活性均较稳定, 第2天后树莓提取物和蓝莓提取物 DPPH·清除活性均明显降低, 接骨木莓提取物 DPPH·清除活性在三天模拟物流过程中较稳定。Hacer 等^[14]将浆果中花青素和非花青素馏分进行抗氧化活性对比, 发现花青素馏分 DPPH·清除活性高于非花青素馏分, 由于花色素环上羟基化和甲氧基化程度和位置影响其形成的花色苷稳定性和抗氧化性^[15], 因此花青素及花色苷含量越高、种类越多, 其稳定性越强且对 DPPH·清除活性的贡献越大。

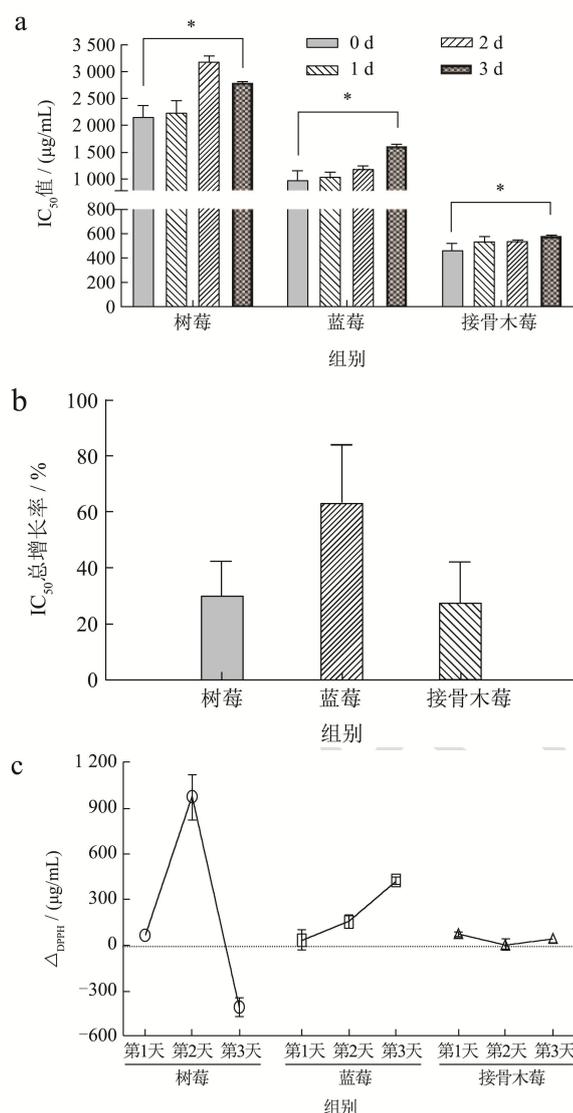


图4 三种浆果提取物 DPPH·清除活性及变化

Fig.4 DPPH· scavenging activity and change of three kinds of berry extract

注: (a) 在模拟物流不同循环时间下蓝莓、树莓和接骨木莓提取物 DPPH·清除活性; (b) 蓝莓、树莓和接骨木莓提取物 DPPH·半数清除浓度 IC₅₀从模拟物流第0天至第3天总增长率; (c) 蓝莓、树莓和接骨木莓提取物 DPPH·清除活性每日变化, 第 n 天 Δ_{DPPH} 表示第 n 天 IC₅₀ 减第 $n-1$ 天 IC₅₀。

根据数据库 Phenol-Explorer^[11]可知, 接骨木莓中花色苷绝对含量最高 (1 316.66 mg/100 g), 故具有最高的初始 DPPH·清除活性且稳定性最好; 蓝莓的多酚组成较复杂, 花色苷、酚酸和黄酮醇绝对含量分别为 133.99、133.23 和 39.8 mg/100 g, 故初始 DPPH·清除活性比接骨木莓低; 树莓花色苷含量最低 (71.94 mg/100 g), 对 DPPH·清除活性贡献较大的鞣花单宁 Lambertianin C 和 Sanguin H-6 含量较高 (分别为 30.84 mg/100 g 和 76.10 mg/100 g)^[16], 但二者在中性、高温 (60~80 °C) 下易降解^[17]。得出结论, 模拟物流温度变化和时间积累对蓝莓提取物、树莓提取物和接骨木莓提取物的 DPPH·清除活性均有显著影响 ($p < 0.05$)。

2.3 模拟物流前后 ORAC 活性变化

氧自由基吸收能力是体外评判抗氧化活性的重要手段, 通常以水溶性维生素 E (Trolox) 为定量标准。树莓提取物、蓝莓提取物和接骨木莓提取物初始 Trolox 当量分别为 0.67、1.44 和 1.36 $\mu\text{mol Trolox/mg}$, 三者 ORAC 活性顺序依次为蓝莓提取物 < 接骨木莓提取物 < 树莓提取物 (图 5a)。在模拟物流不同循环周期下, 三种浆果提取物 ORAC 活性均有较大波动。经历 3 d 模拟物流后, 树莓提取物、蓝莓提取物和接骨木莓提取物的 Trolox 当量总损失率分别为 32.74%、19.72% 和 62.76% (图 5b)。为进一步分析三种浆果提取物在模拟物流不同天数下 ORAC 活性的变化, 分别将三种浆果提取物第 n 天的 Trolox 当量值与第 $n-1$ 天的 Trolox 当量值作差得到 Δ_{ORAC} (图 5c)。在模拟物流第 1 天时, 仅蓝莓提取物 Δ_{ORAC} 为负值 (-0.74 $\mu\text{mol Trolox/mg}$), 而树莓提取物和接骨木莓提取物 $\Delta_{\text{ORAC}} \geq 0$, 说明在模拟物流第 1 天后, 蓝莓提取物 ORAC 活性出现明显下降, 而树莓提取物和接骨木莓提取物 ORAC 活性较稳定; 在模拟物流第 2 天时, 接骨木莓提取物 Δ_{ORAC} 为负值 (-1.30 $\mu\text{mol Trolox/mg}$), ORAC 活性下降; 在模拟物流第 3 天时, 树莓提取物 Δ_{ORAC} 为负值 (-1.00 $\mu\text{mol Trolox/mg}$), ORAC 活性下降。结果表明, 在模拟物流条件下, 三种浆果提取物 ORAC 活性波动较大, 活性下降后仍可能上升, 根据首次出现活性下降时间先后顺序来评判三者稳定性大小, 依次为蓝莓提取物 < 接骨木莓提取物 < 树莓提取物。接骨木莓提取物的多酚质量分数在模拟物流后显著升高 ($p < 0.05$), 表明接骨木莓提取物中多酚组分含量及比例发生变化, 由于酚类物质的组分含量及比例不同会影响整体的氧自由基吸收活性^[17]。因此推断每经历 24 h 模拟公路运输温度变化条件后, 蓝莓提取物、

树莓提取物和接骨木莓提取物中多酚组分发生不同程度的变化,并在不同循环时间下表现出不同的 ORAC 活性。得出结论,模拟物流可能会通过改变酚类物质组分含量及比例引起蓝莓提取物、树莓提取物和接骨木莓提取物 ORAC 活性变化,三者 ORAC 稳定性依次为蓝莓提取物<接骨木莓提取物<树莓提取物。

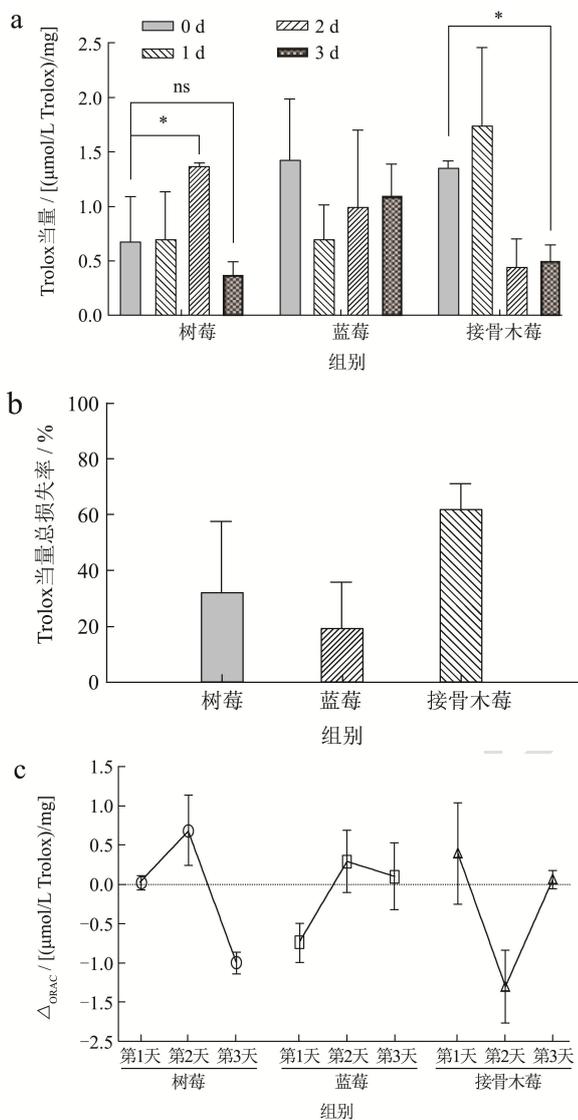


图5 三种浆果提取物 ORAC 活性及变化

Fig.5 ORAC activity and change of three kinds of berry extract

注:(a)在模拟物流不同循环时间下蓝莓、树莓和接骨木莓提取物 ORAC 活性;(b)蓝莓、树莓和接骨木莓提取物 Trolox 当量从模拟物流第 0 天至第 3 天的总损失率;(c)蓝莓、树莓和接骨木莓提取物 ORAC 活性每日变化,第 n d Δ ORAC 表示第 n 天 Trolox 当量减第 $n-1$ 天 Trolox 当量。

3 讨论

浆果含有丰富的多酚类物质,具有较强的抗氧化能力,其提取物常被用作功能性食品的原料。然而,多酚类物质由于存在活性酚羟基而易在运输过程中损

失,使其生物活性降低^[4,5,18,19]。与其它文献对浆果果实的研究结果不同^[20],本文发现三种浆果提取物的多酚含量经过模拟物流三天后并未明显降低,但 DPPH·清除活性和 ORAC 活性均有显著变化。如图 6a 所示,三种浆果的多酚组成不同,但均含有花色苷类和黄酮醇类物质,不同的组分对 ORAC 和 DPPH·清除活性的贡献不同。将 Lutz 等^[21]对不同蔬果多酚含量及抗氧化活性检测数据进行相关性分析,结果显示总多酚含量与 DPPH·清除活性相关系数最高($R=0.94$),总花色苷含量与 ORAC 活性相关系数最高($R=0.97$)(图 6b)。此结果提示在模拟物流过程中三种浆果提取物可能受到温度升高和时间积累的影响,其花色苷降解成花色素。花色素单体在连接不同糖基后抗氧化活性将发生不同的变化^[15],因此 ORAC 活性可能在不同循环时间下发生波动。此外,三种浆果提取物总酚含量均出现先下降后上升的趋势,相应 DPPH·半数清除浓度 IC_{50} 先上升再下降,但总体而言 DPPH·清除活性均下降。

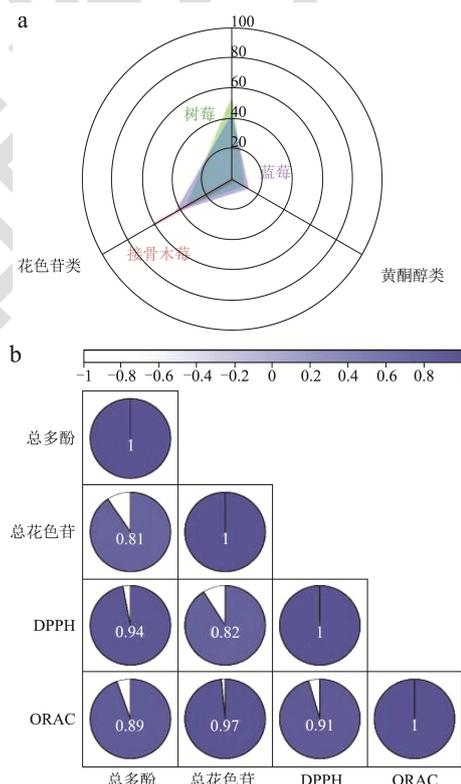


图6 (a)接骨木莓、蓝莓和树莓多酚组成;(b)蓝莓、树莓和接骨木莓多酚组成与 DPPH·清除活性和 ORAC 的相关性分析^[21]

Fig.6 (a) Polyphenol composition of blueberry extract, raspberry extract and elderberry extract; (b) Analysis of correlation between polyphenol composition and DPPH· scavenging activity and ORAC in blueberry, raspberry and elderberry

注:(a)数据来源于数据库 Phenol-Explorer, <http://phenol-explorer.eu>^[12]。

4 结论

本实验通过模拟夏季陆地运输温度变化和时间积累过程以探究蓝莓提取物、树莓提取物和接骨木莓提取物的多酚含量及其抗氧化活性变化。结果显示,在模拟物流温度变化和时间积累的条件下,接骨木莓提取物多酚含量显著增加,而蓝莓提取物和树莓提取物多酚含量受模拟物流影响较小;三者 DPPH·清除活性均显著降低,在模拟物流第 1 天时三者 DPPH·清除能力较稳定,而在第 2 天后蓝莓提取物和树莓提取物的 DPPH·清除能力出现不同程度失稳,仅接骨木莓提取物在三天模拟物流后仍能保持较高的 DPPH·清除能力,三者 DPPH·清除活性稳定性依次为树莓提取物<蓝莓提取物<接骨木莓提取物;三者 ORAC 活性波动较大,按照首次出现活性下降时间先后顺序来评判三者稳定性大小,依次为蓝莓提取物<接骨木莓提取物<树莓提取物。因此,在运输过程中,运输条件(温度和时间)可对浆果提取物中多酚类物质的含量及抗氧化活性产生影响,且提取物的抗氧化能力与酚类物质的种类及占比存在一定的相关性。

参考文献

- [1] CHANG Chefeng, CHO Suzy, WANG Jian. (-)-Epicatechin protects hemorrhagic brain via synergistic Nrf2 pathways [J]. *Annals of Clinical & Translational Neurology*, 2014, 1(4): 258-271
- [2] 房琳琳,赵余庆.树莓的现代药理学及生物活性研究进展[J]. *沈阳药科大学学报*,2014,31(1):74-80
- [3] 陈介甫,李亚东,徐哲.蓝莓的主要化学成分及生物活性[J]. *药科学报*,2010,45(4):422-429
- [4] Martinesen B K, Aaby K, Skrede G. Effect of temperature on stability of anthocyanins, ascorbic acid and color in strawberry and raspberry jams [J]. *Food Chemistry*, 2020, 316: 126297
- [5] 矫馨瑶,李恩惠,王月华,等.蓝莓多酚稳定性及热降解动力学研究[J].*中国食品学报*,2018,18(1):81-87
- [6] Riaz M, Zia-Ul-Haq M, Saad B. Biosynthesis and stability of anthocyanins [J]. Springer International Publishing, 2016: 71-86
- [7] 雷云琛.贮藏条件对浓缩果汁主要色素成分及其抗氧化能力变化的影响[D].湖南:中南林业科技大学,2019
- [8] 黄立葵,贾璐,万剑平,等.沥青路面温度状况的统计分析[J]. *公路工程*,2005,30(3):8-9
- [9] Milella L, Bader A, De Tommasi N, et al. Antioxidant and free radical-scavenging activity of constituents from two *Scorzonera* species [J]. *Food Chemistry*, 2014, 160: 298-304
- [10] Girgih A T, He R, Hasan F M, et al. Evaluation of the in vitro antioxidant properties of a cod (*Gadus morhua*) protein hydrolysate and peptide fractions [J]. *Food Chemistry*, 2015, 173: 652-659
- [11] Azman E M, Charalampopoulos D, Chatzifragkou A. Acetic acid buffer as extraction medium for free and bound phenolics from dried blackcurrant (*Ribes nigrum* L.) skins [J]. *Journal of Food Science*, 2020, 85(11): 3745-3755
- [12] Rothwell J A, Perez-Jimenez J, Neveu V, et al. Phenol-Explorer 3.0: a major update of the Phenol-Explorer database to incorporate data on the effects of food processing on polyphenol content [J]. *Database*, 2013, 1: bat070
- [13] 梁泽明,陈春,伍惠仪,等.三种蓝莓抗氧化及抗 HepG2 细胞增殖活性的比较分析[J].*现代食品科技*,2019,35(6):48-55
- [14] Coklar H, Akbulut M. Anthocyanins and phenolic compounds of *Mahonia aquifolium* berries and their contributions to antioxidant activity [J]. *Journal of Functional Foods*, 2017, 35: 166-174
- [15] Kähkönen M P, Heinonen M. Antioxidant activity of anthocyanins and their aglycons [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, 51(3): 628-633
- [16] Borges G, Degeneve A, Mullen W, et al. Identification of flavonoid and phenolic antioxidants in black currants, blueberries, raspberries, red currants, and cranberries [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(7): 3901-3909
- [17] Puupponen-Pimiä R, Nohynek L, Suvanto J, et al. Natural antimicrobials from cloudberry (*Rubus chamaemorus*) seeds by sanding and hydrothermal extraction [J]. *ACS Food Science & Technology*, 2021, 1(5): 917-927
- [18] Cristea E, Ghendov-Mosanu A, Patras A, et al. The influence of temperature, storage conditions, pH, and ionic strength on the antioxidant activity and color parameters of rowan berry extracts [J]. *Molecules*, 2021, 26(13): 3786
- [19] HIRTH M, Preiß R, MAYER-MIEBACH E, et al. Influence of HTST extrusion cooking process parameters on the stability of anthocyanins, procyanidins and hydroxycinnamic acids as the main bioactive chokeberry polyphenols [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2015, 62(1): 511-516
- [20] Li F, Chen G, Zhang B, et al. Current applications and new opportunities for the thermal and non-thermal processing technologies to generate berry product or extracts with high nutraceutical contents [J]. *Food Research International*, 2017, 100(2): 19-30
- [21] Lutz M, Hernández J, Henríquez C. Phenolic content and antioxidant capacity in fresh and dry fruits and vegetables grown in Chile [J]. *CyTA-Journal of Food*, 2015, 13(4): 541-547