

处理方式对西藏光核桃功能因子及其抗氧化活性的影响

Effects of different treatments on functional components and antioxidant activity of *Prunus mira* Koehne

左力旭^{1,2} 刘常金¹ 毕金峰² 吕健² 金鑫² 周沫²

ZUO Li-xu^{1,2} LIU Chang-jin¹ BI Jin-feng² LV Jian² JIN Xing² ZHOU Mo²

(1. 天津科技大学食品工程与生物技术学院, 天津 300457; 2. 中国农业科学院农产品加工研究所,

北京 100193; 3. 农业农村部农产品加工重点实验室, 北京 100193)

(1. College of Food Engineering and Biotechnology, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China; 2. Institute of Food Science and Technology, CAAS, Beijing 100193, China;

3. Key Laboratory of Agro-Products Processing Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China)

摘要:以西藏光核桃为试材,研究超声、压差闪蒸和蒸汽热烫 3 种处理方式对其功能因子(多酚、黄酮、多糖、果胶)的影响。采用 DPPH、ABTS 和 FRAP 体系评价光核桃功能因子的抗氧化活性,运用线性拟合分析揭示功能因子含量与抗氧化活性之间的关系。结果表明:超声处理使光核桃多酚、黄酮、多糖含量及其抗氧化活性降低,果胶含量及其抗氧化活性显著升高($P < 0.05$);压差闪蒸处理有利于光核桃多糖、果胶含量及其抗氧化活性的提高,不利于多酚和黄酮的保留;蒸汽热烫处理使光核桃多酚、黄酮、多糖、果胶含量及其抗氧化活性显著提高($P < 0.05$),最大程度保留了绿原酸、儿茶素和新绿原酸。其中,蒸汽热烫 1 min 时光核桃多酚含量最高[(15.05 ± 0.04) mg GAE/g DB],蒸汽热烫 3 min 时光核桃黄酮、多糖、果胶含量均达到最高值[分别为 (67.40 ± 0.74) mg RE/g DB、(143.95 ± 0.37) mg GE/g DB、(61.81 ± 1.10) mg GalA/g AIR]。线性拟合分析($P < 0.05$)发现,多酚、黄酮、多糖含量与 DPPH 自由基清除能力呈显著正相关(R^2 分别为 0.756, 0.991, 0.820)。综合分析认为,蒸汽热烫处理适宜作为光核桃深加工的有效预处理方式。

关键词:光核桃;多酚;黄酮;多糖;果胶;抗氧化活性

Abstract: Effects of supersonic treatment (ST), instant controlled pressure drop (ICPD) treatment and steam blanching treatment (SBT) on functional components and antioxidant activity

of *Prunus mira* Koehne were investigated. Diverse methods, including DPPH, ABTS and FRAP, were used to evaluate antioxidant activity of functional components extracted from *Prunus mira* Koehne. Relationship between contents of antioxidant substances and antioxidant activities was analyzed by linear fitting method. Compared with the control group, ST induced a significant decline in contents of antioxidant substances and their antioxidant capacity except pectin ($P < 0.05$); ICPD could increase contents of polysaccharide and pectin and improve their antioxidant activities. However, ICPD had adverse effects on polyphenol and flavonoid; SBT induced a remarkable increase in contents of functional components and enhanced their antioxidant capacity ($P < 0.05$). Moreover, SBT reserved more chlorogenic acid, catechin and neochlorogenic acid than other treatment method. Extracts of *Prunus mira* Koehne had the highest contents of polyphenol [(15.05 ± 0.04) mg GAE/g DB] when treated with steam blanching for 1 min. As steam blanching processing time increased to 3 min, the contents of flavonoid, polysaccharide and pectin of *Prunus mira* Koehne reached their peak value, (67.40 ± 0.74) mg RE/g DB, (143.95 ± 0.37) mg GE/g DB and (61.81 ± 1.10) mg GalA/g AIR, respectively. Line fitting analysis ($P < 0.05$) presented a positive correlation between contents of polyphenol, flavonoid, polysaccharide and their DPPH radical scavenging activity ($R^2 = 0.756, 0.991, 0.820$, respectively). Above all, SBT is supposed to be an effective pretreatment before further processing for *Prunus mira* Koehne.

Keywords: *Prunus mira* Koehne; polyphenol; flavonoid; polysaccharide; pectin; antioxidant activity

基金项目:西藏自治区重大科技专项(编号:XZ201801NA04)

作者简介:左力旭,女,天津科技大学在读硕士研究生。

通信作者:刘常金(1969—),男,天津科技大学副教授,博士。

E-mail: 859405972@qq.com

收稿日期:2019-01-05

光核桃^[1](*Prunus mira* Koehne)作为西藏地区的特

色野生林果,每年产量在 5 000 t 以上^[2],大部分果实成熟后自然脱落,仅少部分用于鲜食,资源浪费严重。

超声、压差闪蒸和蒸汽热烫作为果蔬加工的常用技术,可钝化物料内源酶活性,抑制酶促反应^[3-4],破坏细胞结构,改变物料组织状态^[5-6],有效提高产品加工效率及食用品质。研究发现,蒸汽热烫处理能够有效剥离猕猴桃^[7]、番茄果皮^[8]。丰水梨经热风预干燥,利用压差闪蒸技术制得的脆片,多酚保留量最高,食用品质最佳^[9]。超声处理能够有效去除番茄皮^[10],加快荷兰芹干燥速率,提高叶绿素、叶黄素等物质的保留率^[11]。桃果实味道香甜,营养丰富,富含多酚、黄酮、果胶等功能因子^[12],但在加工过程中功能因子极易被破坏,降低了桃产品的食用价值。目前,关于光核桃中多酚、黄酮、果胶等功能因子的含量以及超声、压差闪蒸和蒸汽热烫处理对光核桃功能因子的影响均尚未见报道。

多酚、黄酮、多糖、果胶等功能因子,具有清除人体自由基,减缓细胞氧化,抗炎、抗癌等功效^[13-14]。为进一步提升光核桃的价值空间,开发高附加值产品,提高其资源利用率,本研究拟采用超声、压差闪蒸、蒸汽热烫 3 种处理方式对光核桃多酚、黄酮、多糖、果胶等功能因子含量及其抗氧化活性的影响,探究功能因子含量与抗氧化活性之间的关系,旨在为光核桃的有效利用和新产品开发提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

光核桃:于 2018 年 9 月 3 日采自西藏林芝地区,冷链空运至北京,4 ℃冷库贮藏备用;

无水碳酸钠、氢氧化钠、亚硝酸钠、九水合硝酸铝、无水乙醇、浓硫酸、甲醇、盐酸、过硫酸钾、三氯化铁:分析纯,国药集团化试剂有限公司;

没食子酸、芦丁、半乳糖醛酸等标品、福林酚试剂、水溶性维生素 E(Trolox)、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、2,2'-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐(ABTS)、2,4,6-三吡啶基三嗪(TPTZ):分析纯,美国 Sigma 公司。

1.1.2 主要仪器设备

电子天平:CPA-125 型,德国 Sartorius 公司;

数控超声波反应器:DT400 型,北京弘祥隆生物技术股份有限公司;

脉动压差闪蒸干燥设备:QDPH10-1 型,天津市勤德新材料科技有限公司;

高效液相色谱:Waters-1525 型,美国 Waters 公司;

离心机:5804R 型,德国 Eppendorf 公司;

水分活度仪:WA-99163 型,美国 Decagon 公司;

紫外—可见分光光度计:UV1800 型,日本岛津公司。

1.2 方法

1.2.1 处理方式

(1) 超声处理:样品置于超声波反应器内,设定操作参数为:频率 40 kHz、功率 0.48 kW,时间分别为 10,20,30 min。

(2) 压差闪蒸处理:样品置于脉动压差闪蒸干燥设备的物料托盘中,设定操作参数为:闪蒸温度 95 ℃,停滞时间 10 min,闪蒸次数分别为 1,2,3。

(3) 蒸汽热烫处理:样品置于蒸锅内,蒸汽温度设为 100 ℃,处理时间分别为 1,2,3 min。

1.2.2 水分含量的测定 参考 GB 5009.3—2016 的直接干燥法。

1.2.3 可溶性固形物的测定 参考 NY/T 2637—2014 的折射仪法。

1.2.4 水分活度的测定 将物料切成薄片,铺满检测盒底部,放进水分活度测定仪进行测定。

1.2.5 功能因子含量的测定

(1) 多酚含量的测定:准确称取样品 2.00 g,加入 80% 甲醇 10 mL,超声辅助提取 1 h 后于 4 ℃、9 000 r/min 离心 15 min,取上清液。重复提取 2 次,合并上清液,定容至 100 mL 即得多酚提取液。含量测定参照 Folin-Ciocalteu 法^[15],以没食子酸为标准品绘制标准曲线,结果表示为每克干样品中所含没食子酸当量(mg GAE/g DB)。

(2) 单酚含量的测定:参考 Oliveira 等^[16]的方法并稍作修改。取 1.2.5(1)中多酚提取液过 0.45 μm 有机系滤膜作为待测液。Agilent TC-C18 色谱柱(4.6 mm × 250 mm,5 μm),柱温 30 ℃,流速 1 mL/min,进样量 10 μL。洗脱程序为:A 相为 2% 甲酸水,B 相为丙酮(0 min,A : B = 95 : 5;20 min,A : B = 75 : 25;40 min,A : B = 60 : 40;45 min,A : B = 75 : 25;50 min,A : B = 95 : 5;55 min,A : B = 95 : 5)。采用外标法计算样品中单酚含量。

(3) 黄酮含量的测定:取 1.2.5(1)中多酚提取液 1 mL 作为待测液,参照 Mokrani 等^[17]的方法进行测定。以芦丁为标准品绘制标准曲线,结果表示为每克干样品中所含芦丁当量(mg RE/g DB)。

(4) 多糖含量的测定:准确称取样品 2.00 g,加入 40 mL 蒸馏水,90 ℃水浴浸提 1 h,超声辅助提取 1 h,抽滤,滤液加入其体积 4 倍的无水乙醇,4 ℃醇沉 24 h 后抽滤,滤渣溶解定容至 100 mL,3 500 D 透析袋透析 72 h 得多糖待测液。采用苯酚—硫酸法^[18]进行测定,以葡萄糖为标准品绘制标准曲线,结果表示为每克干样品中所含葡萄糖当量(mg GE/g DB)。

(5) 果胶含量的测定:准确称取样品 30.00 g,加入 95% 乙醇 150 mL,醇沉 14 h 后过滤,滤渣用 95% 乙醇洗涤至无色后于 40 ℃烘箱烘干,得到醇不溶性物质(AIR)。准

准确称取 0.50 g AIR,加入 90 mL 蒸馏水,沸水浴 5 min,冷却后过滤,滤液定容至 100 mL,3 500 D 透析袋透析 72 h 得果胶待测液。参考 Mccready 等^[19]的方法进行含量测定,以半乳糖醛酸为标准品绘制标准曲线,结果表示为每克醇不溶性物质中半乳糖醛酸当量(mg GalA/g AIR)。

1.2.6 功能因子抗氧化活性的测定

(1) DPPH 自由基清除能力:参考 Si 等^[20]的方法并稍作修改。将 2 mL 样品或 Trolox 标准液与 4 mL 100 $\mu\text{mol/L}$ DPPH 混匀,暗处静置 30 min,517 nm 处测吸光值,结果表示为每克干样品中所含 Trolox 当量($\mu\text{mol Trolox/g}$)。

(2) ABTS 自由基清除能力:参 Yeoh 等^[21]的方法并稍作修改。将 0.4 mL 样品或 Trolox 标准液与 3.6 mL 100 $\mu\text{mol/L}$ ABTS 混匀,734 nm 处测吸光值,结果表示为 $\mu\text{mol Trolox/g}$ 。

(3) FRAP 铁离子还原能力:参考 Jayasekera 等^[22]的方法并稍作修改。将 0.2 mL 样品或 Trolox 标准液与

6 mL FRAP 混匀,37 $^{\circ}\text{C}$ 条件下保温 30 min,593 nm 处测吸光值,结果表示为 $\mu\text{mol Trolox/g}$ 。

1.2.7 统计方法 采用 Excel、SPSS 20 对数据进行处理,Origin 8.5 进行作图。每组试验重复 3 次,试验结果以平均值 $\pm$ 标准偏差表示。

2 结果与分析

2.1 处理方式对光核桃水分含量、可溶性固形物、水分活度的影响

由表 1 可知,超声处理破坏了光核桃的细胞结构,部分内容物流失^[23],可溶性固形物减少;自由水增加,水分含量和水分活度升高。压差闪蒸处理使光核桃内部水分瞬间蒸发,水分含量和水分活度降低;细胞在压差作用下胀裂,物料孔隙度增加^[24],促进内容物溶出,可溶性固形物增加。蒸汽热烫处理在光核桃表面形成薄水层,水分含量增加,水分活度升高;部分细胞在热力作用下坍塌^[5],内容物流失,可溶性固形物略有降低。

表 1 处理方式对光核桃水分含量、可溶性固形物、水分活度的影响[†]

Table 1 Effect of different treatments on moisture content, soluble solid content and water activity of *Prunus mira* Koehne

处理方式	水分含量/(10 ⁻² g·g ⁻¹)	可溶性固形物/ $^{\circ}\text{Brix}$	水分活度
对照组	84.67 $\pm$ 0.09 ^a	11.33 $\pm$ 0.15 ^d	0.95 $\pm$ 0.01 ^e
超声处理 10 min	88.51 $\pm$ 0.41 ^c	7.44 $\pm$ 0.24 ^f	0.96 $\pm$ 0.01 ^{de}
超声处理 20 min	89.14 $\pm$ 0.06 ^b	6.74 $\pm$ 0.12 ^g	0.97 $\pm$ 0.00 ^{bed}
超声处理 30 min	90.29 $\pm$ 0.06 ^a	6.10 $\pm$ 0.07 ^h	0.98 $\pm$ 0.01 ^{ab}
压差闪蒸 1 次	85.06 $\pm$ 0.31 ^f	12.17 $\pm$ 0.05 ^c	0.91 $\pm$ 0.01 ^f
压差闪蒸 2 次	83.65 $\pm$ 0.18 ^b	12.50 $\pm$ 0.06 ^b	0.89 $\pm$ 0.01 ^g
压差闪蒸 3 次	83.61 $\pm$ 0.11 ^b	12.96 $\pm$ 0.04 ^a	0.86 $\pm$ 0.01 ^h
蒸汽热烫 1 min	87.32 $\pm$ 0.27 ^d	10.96 $\pm$ 0.04 ^e	0.97 $\pm$ 0.00 ^{cd}
蒸汽热烫 2 min	86.98 $\pm$ 0.22 ^d	10.87 $\pm$ 0.09 ^e	0.97 $\pm$ 0.00 ^{bc}
蒸汽热烫 3 min	86.31 $\pm$ 0.21 ^e	10.80 $\pm$ 0.17 ^e	0.99 $\pm$ 0.00 ^a

[†] 同列字母不同表示差异显著(P<0.05)。

2.2 处理方式对光核桃功能因子含量的影响

2.2.1 多酚和单酚含量 酚类物质主要分布在植物细胞的液泡中,处理方式对液泡破坏程度不同,对酚类物质的影响也不同^[25]。相比对照组,超声和压差闪蒸处理均不利于光核桃多酚的保留,蒸汽热烫处理可显著提高光核桃多酚的含量(图 1),其中,光核桃经蒸汽热烫 1 min,多酚含量增加了 20%。由图 2 可知,蒸汽热烫处理能够较好地保留光核桃的主要单酚(新绿原酸、儿茶素和绿原酸)物质。与新绿原酸相比,绿原酸和儿茶素相对稳定,保留率较高。相比较对照组,蒸汽热烫对绿原酸、儿茶素含量基本无影响,而超声处理和压差闪蒸处理降低绿原酸和儿茶素含量;而 3 种处理方式对新绿原酸均有破坏作用。

研究发现超声通过破坏植物细胞可高效辅助提取多酚^[6]、多糖^[26]、果胶^[27]等功能性物质。同样,超声处理可促进光核桃中酚类物质溶出,但超声引起的局部高温(5 000 K)导致水分子分解,产生 $\cdot\text{OH}$,酚类物质因猝灭自由基造成检测量降低^[28]。压差闪蒸通过高温和压力差推动光核桃内部水分快速蒸发,液泡和细胞膜破裂,形成多孔通道^[29],引起酚类物质与氧气发生氧化降解。蒸汽热烫过程中,光核桃表面形成隔氧薄水层,高温钝化多酚氧化酶,二者有效阻止酚类物质被氧化^[30],但过长时间的热处理会导致多酚降解。

2.2.2 黄酮含量 黄酮是 2 个带有酚羟基的苯环经由中心三碳链相互连接而形成的一系列化合物^[31],属于酚类物质。由图 3 可知,蒸汽热烫处理对光核桃中黄酮的保

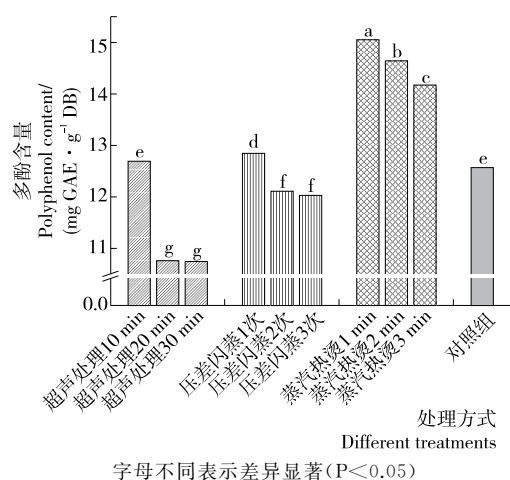


图1 处理方式对光核桃多酚含量的影响

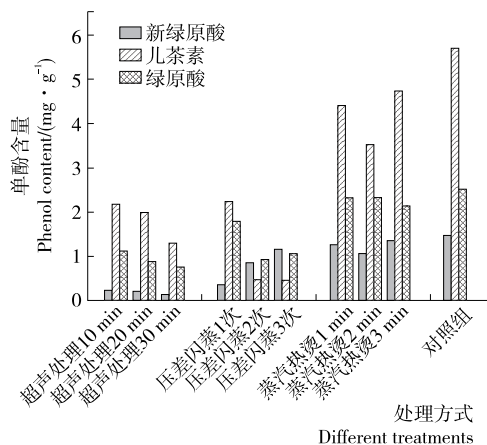
Figure 1 Effect of different treatments on polyphenol content of *Prunus mira* Koehne

图2 处理方式对光核桃单酚含量的影响

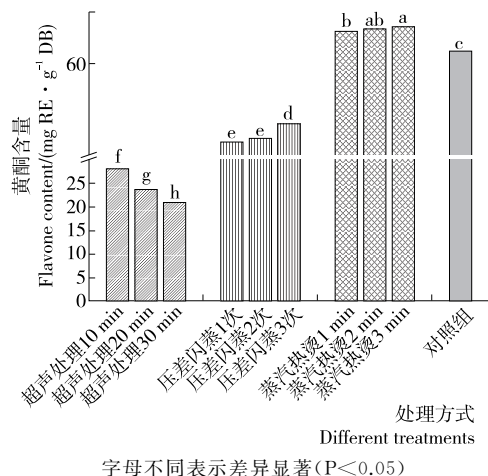
Figure 2 Effect of different treatments on phenol content of *Prunus mira* Koehne

图3 处理方式对光核桃黄酮含量的影响

Figure 3 Effect of different treatments on flavone content of *Prunus mira* Koehne

留率显著高于超声和压差闪蒸处理。其中,超声处理 30 min,黄酮含量仅为对照组的 1/3。压差闪蒸 1 次,黄酮含量约为对照组的 70%。蒸汽热烫 3 min 时,黄酮含量高出对照组 5 mg RE/g DB 左右。

2.2.3 多糖含量 相比较对照组,光核桃经超声处理后多糖含量显著降低,且随处理时间延长不断减少(图 4)。光核桃多糖含量随压差闪蒸次数的增加呈升高趋势,压差闪蒸 3 次时,多糖含量比对照组高出 11.84%。蒸汽热烫显著提高光核桃多糖的含量,且随处理时间的延长而增加,与张霁^[32]的研究结果一致。

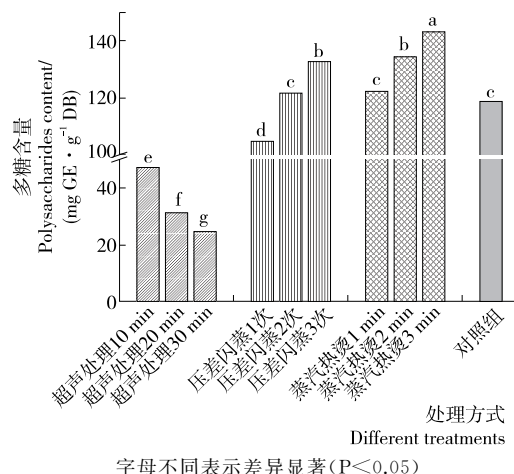


图4 处理方式对光核桃多糖含量的影响

Figure 4 Effect of different treatments on polysaccharides content of *Prunus mira* Koehne

多糖是结构复杂的大分子聚合物,在较强外力作用下易发生降解。研究^[33-34]发现超声可打断 C—O—C 和 C—O—H 键,使多糖主链断裂,降解为寡糖甚至单糖,导致多糖含量降低。压差闪蒸产生的压力差可破坏光核桃完整的细胞结构,高湿高热水蒸气带动组织中高分子物质发生转移,形成疏松的多孔通道,促进多糖物质溶出^[35]。在蒸汽热烫处理过程中,纤维素、半纤维素、果胶等细胞壁物质受热发生解聚重排,引起光核桃组织松弛坍塌,促进可溶性多糖溶出^[36]。

2.2.4 果胶含量 光核桃经不同处理后的果胶含量如图 5 所示,其变化趋势与多糖含量的变化趋势一致,推测果胶可能是光核桃多糖的主要成分。此外,除超声处理 30 min 外,其他处理组果胶含量均高于对照组,其中蒸汽热烫 3 min 时果胶含量高达 (57.00 ± 2.74) mg GalA/g AIR。由此可见,3 种处理方式均能促进光核桃果胶的溶出。研究发现超声可通过破坏细胞壁促进果胶的溶出^[37],压差闪蒸使大分子物质发生分离重排,促使纤维素表面结合不紧密的果胶脱离,引起果胶含量增加^[38],蒸汽热烫使细胞壁果胶发生脱甲酯化和 β-解聚,降低果胶与纤维素等物质的结合,促进果胶溶出^[39]。

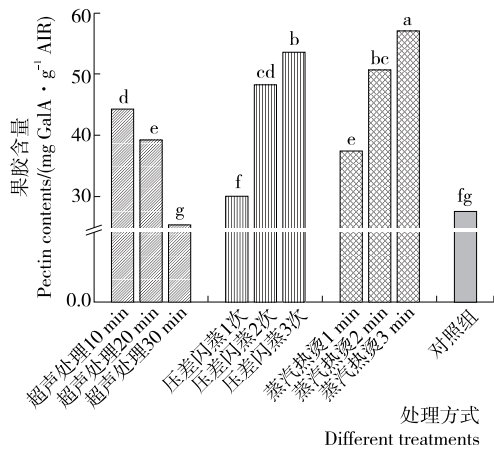


图 5 处理方式对光核桃果胶含量的影响
Figure 5 Effect of different treatments on pectin content of *Prunus mira* Koehne

2.3 处理方式对光核桃功能因子抗氧化活性的影响

DPPH 自由基清除能力、FRAP 铁离子还原能力和 ABTS 自由基清除能力是功能因子体外抗氧化活性最常用的评价方法。其中,DPPH 自由基通过单电子氧化酚羟基和中间产物歧化反应 2 个过程将酚类物质氧化成醌类物质,自身还原为 DPPH₂^[40]。FRAP 铁原子还原试验是在低 pH 条件下,酚类、维生素 C 等抗氧化活性物质通过提供氢原子终止自由基链反应,将 Fe³⁺-TPTZ 还原为 Fe²⁺^[41]。不同试样与 ABTS 自由基反应机制不同,电子转移和氢质子转移 2 种途径均可清除 ABTS 自由基,优势途径与试样的组成、结构相关^[42]。

2.3.1 多酚和黄酮的抗氧化活性 由表 2 可知,相比较对照组,光核桃经蒸汽热烫处理后,多酚和黄酮含量显著升高,羟基数目随之增加,多酚和黄酮 DPPH 自由基清除能力、FRAP 铁离子还原能力和 ABTS 自由基清除能力均显著提高。光核桃多酚和黄酮的含量及其抗氧化活性随超声、压差闪蒸处理呈显著降低趋势。光核桃多酚和黄酮的 DPPH 自由基清除能力和 FRAP 铁原子还原能力随超声处理时间延长、闪蒸次数增加、蒸汽热烫时间延长呈增加或减少趋势,而 ABTS 自由基清除能力无明显趋势,这是由于 ABTS 自由基的清除因试样结构及组成不同达到的反应终点不同造成的^[43]。

2.3.2 多糖的抗氧化活性 相比较超声处理,压差闪蒸和蒸汽热烫处理可显著提高光核桃多糖的抗氧化活性(表 3)。相比较对照组,只有蒸汽热烫处理能显著提高光核桃多糖的 DPPH 自由基清除能力和 FRAP 铁原子还原能力。光核桃受热后多糖链断裂,分子量降低,构象改变,大量羟基基团暴露,抗氧化活性升高^[26,44]。

2.3.3 果胶的抗氧化活性 超声、压差闪蒸和蒸汽热烫

表 2 处理方式对光核桃多酚和黄酮抗氧化活性的影响[†]
Table 2 Effect of different treatments on antioxidant capacity of polyphenol and flavone of *Prunus mira* Koehne $\mu\text{mol Trolox/g}$

处理方式	DPPH	FRAP	ABTS
对照组	185.35±2.61 ^e	207.50±0.29 ^d	67.85±0.70 ^a
超声处理 10 min	104.46±1.72 ^g	128.16±0.72 ^h	30.19±1.17 ^f
超声处理 20 min	80.46±0.30 ^h	117.92±1.98 ⁱ	21.11±1.80 ^g
超声处理 30 min	76.98±1.54 ^h	102.20±0.45 ^j	38.35±0.86 ^e
压差闪蒸 1 次	147.45±2.88 ^f	161.66±1.73 ^g	45.90±0.46 ^d
压差闪蒸 2 次	151.95±1.11 ^e	183.23±1.06 ^f	46.22±0.66 ^d
压差闪蒸 3 次	157.36±2.41 ^d	187.44±2.64 _e	49.92±1.02 ^c
蒸汽热烫 1 min	203.87±1.33 ^b	261.39±0.45 ^c	68.04±2.37 ^a
蒸汽热烫 2 min	205.46±0.75 ^b	264.29±0.63 ^b	60.37±1.21 ^b
蒸汽热烫 3 min	210.47±2.41 ^a	273.93±0.32 ^a	66.90±1.43 ^a

[†] 同列字母不同表示差异显著(P<0.05)。

表 3 处理方式对光核桃多糖抗氧化活性的影响[†]
Table 3 Effect of different treatments on antioxidant capacity of polysaccharides of *Prunus mira* Koehne $\mu\text{mol Trolox/g}$

处理方式	DPPH	FRAP	ABTS
对照组	3.97±0.01 ^c	6.67±0.18 ^a	6.15±0.18 ^c
超声处理 10 min	1.31±0.18 ^d	2.13±0.09 ^g	1.53±0.13 ^b
超声处理 20 min	1.35±0.28 ^d	1.65±0.30 ^h	1.57±0.11 ^{gh}
超声处理 30 min	1.36±0.12 ^d	1.24±0.23 ⁱ	1.76±0.11 ^g
压差闪蒸 1 次	4.35±0.05 ^b	4.17±0.18 ^d	6.50±0.04 ^b
压差闪蒸 2 次	4.01±0.02 ^c	6.27±0.16 ^b	6.44±0.10 ^b
压差闪蒸 3 次	4.09±0.09 ^c	5.84±0.11 ^c	5.56±0.08 ^e
蒸汽热烫 1 min	5.16±0.11 ^a	6.72±0.18 ^a	6.98±0.11 ^a
蒸汽热烫 2 min	4.20±0.14 ^{bc}	3.67±0.11 ^e	5.89±0.12 ^d
蒸汽热烫 3 min	4.14±0.17 ^{bc}	3.33±0.07 ^f	5.16±0.02 ^f

[†] 同列字母不同表示差异显著(P<0.05)。

处理均可显著提高光核桃果胶的抗氧化活性(表 4),其中,压差闪蒸处理对果胶抗氧化活性的提高最为显著。由图 5 可知,光核桃经蒸汽热烫处理后果胶含量高于压差闪蒸处理,但其抗氧化活性显著低于压差闪蒸处理(表 4),可能是压差闪蒸处理使果胶链断裂,抗氧化基团暴露,构象发生改变,抗氧化活性加强^[44]。

2.4 不同处理条件下光核桃功能因子含量与其抗氧化活性的关系

光核桃多酚含量与 DPPH 自由基清除能力、FRAP 铁原子还原能力、ABTS 自由基清除能力的线性相关系数分别为 0.794,0.756,0.573[图 6(a)],黄酮分别为 0.991,0.885,0.945[图 6(b)],多糖分别为 0.857,0.802,0.572

表 4 处理方式对光核桃果胶抗氧化活性的影响[†]Table 4 Effect of different treatments on antioxidant capacity of pectin of *Prunus mira* Koehne

处理方式	$\mu\text{mol Trolox/g AIR}$		
	DPPH	FRAP	ABTS
对照组	132.67 $\pm$ 1.09 ^e	125.03 $\pm$ 4.07 ^g	169.15 $\pm$ 4.66 ^e
超声处理 10 min	163.84 $\pm$ 4.83 ^{bcd}	156.05 $\pm$ 2.10 ^f	197.67 $\pm$ 2.42 ^{cd}
超声处理 20 min	165.71 $\pm$ 4.92 ^{bc}	155.71 $\pm$ 5.18 ^{de}	198.41 $\pm$ 2.10 ^{cd}
超声处理 30 min	170.62 $\pm$ 2.78 ^b	171.78 $\pm$ 3.10 ^d	203.96 $\pm$ 2.85 ^c
压差闪蒸 1 次	209.58 $\pm$ 4.36 ^a	225.37 $\pm$ 3.98 ^{ab}	243.41 $\pm$ 7.58 ^b
压差闪蒸 2 次	216.36 $\pm$ 6.38 ^a	231.01 $\pm$ 3.74 ^a	269.15 $\pm$ 7.14 ^a
压差闪蒸 3 次	217.09 $\pm$ 8.13 ^a	220.67 $\pm$ 5.77 ^b	246.93 $\pm$ 9.33 ^b
蒸汽热烫 1 min	165.86 $\pm$ 5.16 ^{bc}	192.97 $\pm$ 1.68 ^c	196.00 $\pm$ 7.88 ^{cd}
蒸汽热烫 2 min	157.78 $\pm$ 7.12 ^{cd}	161.95 $\pm$ 4.89 ^{ef}	193.41 $\pm$ 0.64 ^d
蒸汽热烫 3 min	163.26 $\pm$ 7.33 ^d	156.74 $\pm$ 4.27 ^f	191.37 $\pm$ 0.64 ^d

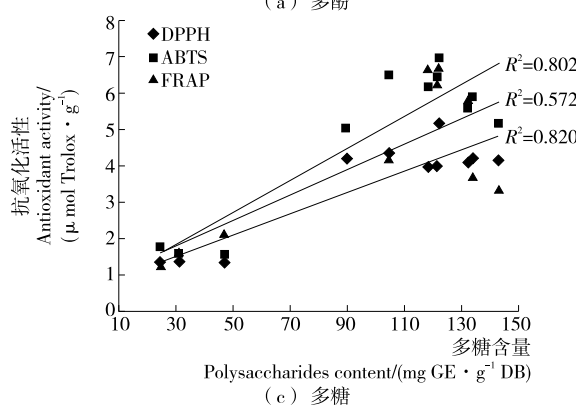
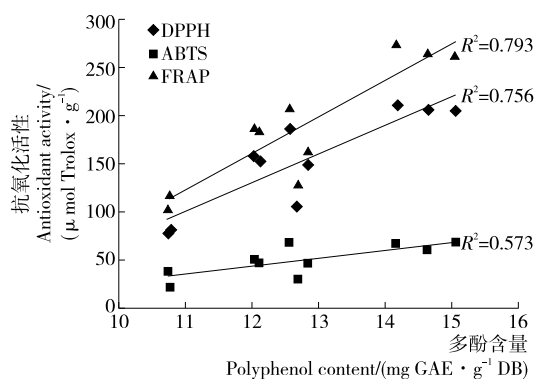
[†] 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

图 6 光核桃功能因子含量与其抗氧化活性之间的拟合关系

Figure 6 Relationship between content of antioxidant substances and antioxidant activity in *Prunus mira* Koehne

续研究将围绕蒸汽热烫处理对光核桃系列产品品质的影响展开。

参考文献

- [1] 方江平, 钟政昌, 钟国辉. 林芝地区光核桃种群的年龄结构[J]. 林业科技开发, 2008, 22(1): 53-56.
- [2] 蔡长河, 钟明, 肖维强, 等. 西藏野桃果实的特性及综合加

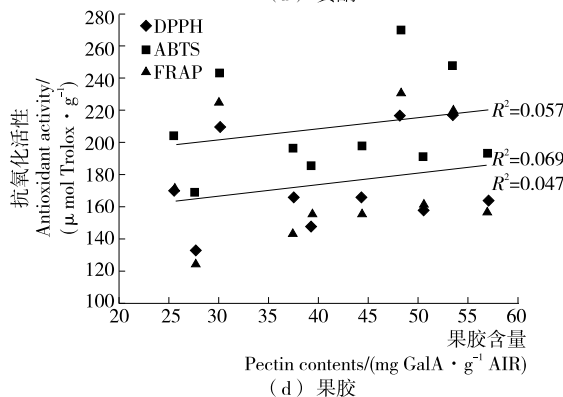
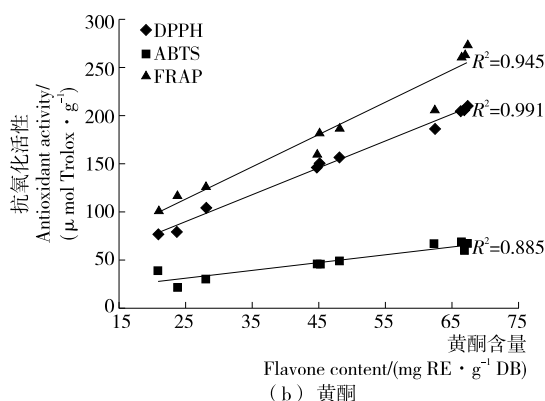
工利用研究[J]. 食品科学, 2002, 23(11): 73-76.

[3] 杨明冠, 李坤, 朱传合, 等. 超声处理钝化鲜切苹果多酚氧化酶动力学研究[J]. 食品科学技术学报, 2015, 33(2): 29-33.

[4] GAO Kun, ZHOU Lin-yan, BI Jin-feng, et al. Evaluation of browning ratio in an image analysis of apple slices at different stages of instant controlled pressure drop-assisted hot-air dr-

3 结论

① 超声处理和压差闪蒸处理均不利于光核桃多酚、黄酮、多糖含量及抗氧化活性的保留,但超声处理可提高果胶的抗氧化活性,压差闪蒸处理可提高多糖、果胶的抗氧化活性;② 蒸汽热烫能够显著提高光核桃多酚、黄酮、多糖、果胶的含量及其抗氧化活力;③ 光核桃经不同处理后,其多酚、黄酮、多糖含量与 DPPH 自由基清除能力呈正相关,量效关系显著,因此 DPPH 法能稳定表征功能因子含量与抗氧化活性之间的关系。综上所述,蒸汽热烫处理可作为保留光核桃功效因子的有效预处理技术,后



工利用研究[J]. 食品科学, 2002, 23(11): 73-76.

- [3] 杨明冠, 李坤, 朱传合, 等. 超声处理钝化鲜切苹果多酚氧化酶动力学研究[J]. 食品科学技术学报, 2015, 33(2): 29-33.
- [4] GAO Kun, ZHOU Lin-yan, BI Jin-feng, et al. Evaluation of browning ratio in an image analysis of apple slices at different stages of instant controlled pressure drop-assisted hot-air dr-

- ying (AD-DIC)[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2017, 97(8): 2 533-2 540.
- [5] PRIECINA L, KARKLINA D, KINCE T. The impact of steam-blanching and dehydration on phenolic, organic acid composition, and total carotenoids in celery roots[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, 49: 192-201.
- [6] NAYAK B, DAHMOUNE F, MOUSSI K, et al. Comparison of microwave, ultrasound and accelerated-assisted solvent extraction for recovery of polyphenols from Citrus sinensis peels [J]. Food Chemistry, 2015, 187: 507-516.
- [7] 陈海峰, 刘晴, 曾书琴. 猕猴桃蒸汽热烫去皮工艺研究[J]. 食品科技, 2016, 41(6): 117-120.
- [8] 张聪, 林立雪. 番茄表皮恒压蒸汽热烫及真空处理系统的研制[J]. 食品与机械, 2014, 30(5): 147-150, 157.
- [9] 唐璐璐, 易建勇, 毕金峰, 等. 干燥方式对丰水梨片酚类物质含量及其抗氧化活性的影响[J]. 中国食品学报, 2017, 17(12): 129-138.
- [10] 王丽娟, 姜鹏, 邹明明, 等. 功率超声对番茄去皮的影响[J]. 中国食品学报, 2019, 19(2): 185-191.
- [11] SLEDZ M, WIKTOR A, RYBAK K, et al. The impact of ultrasound and steam blanching pre-treatments on the drying kinetics, energy consumption and selected properties of parsley leaves [J]. Applied Acoustics, 2016, 103: 148-156.
- [12] MONTEVECCHI G, SIMONE G V, MASINO F, et al. Physical and chemical characterization of Pescabivona, a Sicilian white flesh peach cultivar [*Prunus persica* (L.) Batsch][J]. Food Research International, 2012, 45(1): 123-131.
- [13] KIM H J, PARK K K, CHUNG W Y, et al. Protective effect of white-fleshed peach [*Prunus persica* (L.) Batsch] on chronic nicotine-induced toxicity[J]. Journal of Cancer Prevention, 2017, 22(1): 22-32.
- [14] VAIO C D, MARALLO N, GRAZIANI G, et al. Evaluation of fruit quality, bioactive compounds and total antioxidant activity of flat peach cultivars[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2015, 95(10): 2 124-2 131.
- [15] DAHMOUNE F, NAYAK B, MOUSSI K, et al. Optimization of microwave-assisted extraction of polyphenols from *Myrtus communis* L. leaves[J]. Food Chemistry, 2015, 166: 585-595.
- [16] OLIVEIRA A, ALEXANDRE E M C, COELHO M, et al. Peach polyphenol and carotenoid content as affected by frozen storage and pasteurization[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 66: 361-368.
- [17] MOKRANI A, MADANI K. Effect of solvent, time and temperature on the extraction of phenolic compounds and antioxidant capacity of peach (*Prunus persica* L.) fruit[J]. Separation and Purification Technology, 2016, 162: 68-76.
- [18] 王斐娟, 李峰, 李倩. 鹿角及鹿骨中总多糖含量比较分析[J]. 中华中医药学刊, 2018(12): 2 971-2 974.
- [19] MCCREADY R M, MCCOMB E A. Extraction and determination of total pectic materials in fruits[J]. Analytical Chemistry, 1952, 24(12): 1 986-1 988.
- [20] SI Xu, CHEN Qin-qin, BI Jin-feng, et al. Comparison of different drying methods on the physical properties, bioactive compounds and antioxidant activity of raspberry powders[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2016, 96(6): 2 055-2 062.
- [21] YEOH W K, ALI A. Ultrasound treatment on phenolic metabolism and antioxidant capacity of fresh-cut pineapple during cold storage[J]. Food Chemistry, 2017, 216: 247-253.
- [22] JAYASEKERA S, MOLAN A L, GARG M, et al. Variation in antioxidant potential and total polyphenol content of fresh and fully-fermented Sri Lankan tea[J]. Food Chemistry, 2011, 125(2): 536-541.
- [23] HOSSAIN M B, BRUNTON N P, PATRAS A, et al. Optimization of ultrasound assisted extraction of antioxidant compounds from marjoram (*Origanum majorana* L.) using response surface methodology[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2012, 19(3): 582-590.
- [24] ABDULLA G, BELGHIT A, ALLAF K. Impact of instant controlled pressure drop treatment on moisture adsorption isotherm of cork granules[J]. Drying Technology, 2009, 27(2): 237-247.
- [25] PADAYACHEE A, NETZEL G, NETZEL M, et al. Binding of polyphenols to plant cell wall analogues-Part 2: Phenolic acids[J]. Food Chemistry, 2012, 135(4): 2 287-2 292.
- [26] WANG Li-bo, CHENG Long, LIU Fang-cheng, et al. Optimization of ultrasound-assisted extraction and structural characterization of the polysaccharide from pumpkin (*Cucurbita moschata*) seeds[J]. Molecules, 2018, 23(7): 1 207, 26.
- [27] WANG Wen-jun, MA Xiao-bin, XU Yu-ting, et al. Ultrasound-assisted heating extraction of pectin from grapefruit peel: Optimization and comparison with the conventional method[J]. Food Chemistry, 2015, 178: 106-114.
- [28] 王鹏旭, 成传香, 马亚琴, 等. 超声声学效应在果蔬酚类化合物提取中的应用[J/OL]. 食品科学.(2018-10-19). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20181018.1501.024.html>.
- [29] PENG Jian, YI Jian-yong, BI Jin-feng, et al. Freezing as pretreatment in instant controlled pressure drop (DIC) texturing of dried carrot chips; Impact of freezing temperature[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 89: 365-373.

(下转第 158 页)

- antioxidant capacity in human subjects: A meta-analysis[J]. British Journal of Nutrition, 2013, 109(9): 1 544-1 556.
- [6] QI Hui, LI Shi-xue. Dose-response meta-analysis on coffee, tea and caffeine consumption with risk of Parkinson's disease[J]. Geriatrics & Gerontology International, 2014, 14(2): 430-439.
- [7] 张晨, 王子硕, 吴荣琳, 等. 红茶浸出物抑制人舌鳞状细胞癌细胞增殖活力的实验研究[J]. 安徽医学, 2013, 34(7): 861-864.
- [8] 洪乐乐, 陈宇宏, 李勤, 等. PM 2.5 致肺损伤及茶叶对肺部疾病防治作用的研究进展[J]. 茶叶通讯, 2016, 43(2): 8-12, 65.
- [9] 林勇, 刘仲华, 马蕊. 茶叶中表没食子儿茶素没食子酸酯抑制中波紫外线诱导 HaCaT 细胞氧化损伤研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(4): 1 224-1 228.
- [10] 马蕊, 刘仲华, 黄建安, 等. 绿茶和红茶提取物抑制中波紫外线诱导 HaCaT 细胞氧化损伤和凋亡的比较[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2013, 39(4): 377-381.
- [11] 郭新荣, 王岳飞, 张士康, 等. 茶多酚保健功能研究进展与保健食品开发[J]. 茶叶科学, 2010, 30(增刊 1): 501-505.
- [12] 李友勇, 方成刚, 孙雪梅, 等. 滇南古树晒青茶品质化学成分特征研究[J]. 南农业学报, 2014, 27(5): 1 874-1 883.
- [13] 陈金娥, 丰慧君, 张海容. 红茶、绿茶、乌龙茶活性成分抗氧化性研究[J]. 食品科学, 2009, 30(3): 62-66.
- [14] 金伟, 陈雪, 易有金, 等. 不同类型茶叶体外抗氧化能力的比较分析[J]. 中国食品学报, 2014(8): 262-269.
- [15] 陈美丽, 唐德松, 龚淑英, 等. 绿茶滋味品质的定量分析及其相关性评价[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2014, 40(6): 670-678.
- [16] 李志强, 葛彦双, 曾春茜, 等. 油茶茶叶茶多酚的提取及其抗氧化活性研究[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2014, 51(5): 1 056-1 062.
- [17] WOJDYLO A, OSZMIANSKI J, CZEMERYSR. Antioxidant activity and phenolic compounds in 32 selected herbs[J]. Food Chemistry, 2007, 105(3): 940-949.
- [18] BENZIE I F, STRAIN J J. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of antioxidant power: The FRAP assay[J]. Analytical Biochemistry, 1996, 239(1): 70-76.
- [19] BENZIE I F, SZETO Y T. Total antioxidant capacity of teas by the ferric reducing/antioxidant power assay[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1999, 47(2): 633-636.
- [20] SHEN Yun, JIN Ling, XIAO Peng, et al. Total phenolics flavonoids antioxidant capacity in rice grain and their relations to grain color, size and weight[J]. Journal of Cereal Science, 2009, 49(1): 106-111.
- [21] 蔡宁晨, 苏平, 刘晓霞, 等. 紫苏叶花色苷抗氧化作用的研究[J]. 中国食品学报, 2012, 12(11): 32-36.
- [22] QUE Fei, MAO Lin-chun, PAN Xin. Antioxidant activities of five Chinese rice wines and the involvement of phenolic compounds[J]. Food Research International, 2006, 39: 581-587.
- [23] QUE Fei, MAO Lin-chun, FANG Xue-hua, et al. Comparison of hot air-drying and freeze-drying on the physicochemical properties and antioxidant activities of pumpkin (*Cucurbita moschata*, Duch.) flours[J]. Ecological Indicators, 2015, 124(4): A685-A685.
- [24] 崔宏春, 余继忠, 张建勇, 等. 加工工艺对绿茶儿茶素组分和茶多酚保留率的影响[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(4): 209-212.

(上接第 151 页)

- [30] NDIAYE C, XU Shi-ying, WANG Zhang. Steam blanching effect on polyphenoloxidase, peroxidase and color of mango (*Mangifera indica* L.) slices[J]. Food Chemistry, 2009, 113(1): 92-95.
- [31] 郎宇曦, 马岩, 李斌, 等. 黄酮类化合物与其他化合物相互作用的研究进展[J]. 食品科学, 2018(9): 258-264.
- [32] 张霖, 王丰俊, 王建中. 甘薯根颈四种不同预处理方式多糖含量研究[J]. 安徽农业科学, 2008(15): 6 247-6 248.
- [33] 王振斌, 刘加友, 马海乐, 等. 无花果多糖提取工艺优化及其超声波改性[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 262-269.
- [34] 张杰, 孙源. 超声提取蛹虫草多糖及其抗氧化活性分析[J]. 食品科技, 2013, 38(5): 203-207.
- [35] 毕金峰, 魏益民. 果蔬变温压差膨化干燥技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 308-312.
- [36] 刘璐, 王桂植, 乔宇, 等. 烫漂方式对香菇中多糖含量及其抗氧化活性的影响[J]. 食品工业, 2017, 38(1): 175-178.
- [37] TOMA M, VINATORU M, PANIWNKY L, et al. Investigation of the effects of ultrasound on vegetal tissues during solvent extraction[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2001, 8(2): 137-142.
- [38] CHERIAN B M, LEO A L, SOUZA S F D, et al. Isolation of nanocellulose from pineapple leaf fibres by steam explosion[J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 81(3): 720-725.
- [39] BOROWSKI J, NARWOJSZ A, BOROWSKA E J, et al. The effect of thermal processing on sensory properties, texture attributes and pectic changes in broccoli[J]. Czech Journal of Food Sciences, 2015, 33(3): 254-260.
- [40] 杨盈, 严宝珍, 聂舟, 等. α -生育酚与自由基 DPPH $\cdot$ 的反应机理研究[J]. 波谱学杂志, 2008(3): 331-336.
- [41] BENZIE F, STRAIN J. Ferric reducing/antioxidant power assay: direct measure of total antioxidant activity of biological fluids and modified version for simultaneous measurement of total antioxidant power and ascorbic acid concentration[J]. Methods in Enzymology, 1999, 299: 15-27.
- [42] 林恋竹, 赵谋明. 反应时间对 DPPH $\cdot$ 法、ABTS $^{+}$ 法评价抗氧化性结果的影响[J]. 食品科学, 2010, 31(5): 63-67.
- [43] 倪德江. 乌龙茶多糖的形成特征、结构、降血糖作用及其机理[D]. 武汉: 华中农业大学, 2003: 50-51.
- [44] XIE Fan, ZHANG Wei, LAN Xiao-hong, et al. Effects of high hydrostatic pressure and high pressure homogenization processing on characteristics of potato peel waste pectin[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 196: 474-482.