

热风干燥温度对老山芹品质的影响

绰尔鹏, 赵玉红

(东北林业大学林学院, 黑龙江哈尔滨 150040)

摘要: 本研究探讨不同热风干燥温度(40、60、80、100 °C)对老山芹干燥特性(干燥曲线、干燥速率曲线、干燥方程拟合)、成分(总多酚、总黄酮、叶绿素)和性质(抗氧化活性、颜色变化)的影响。结果表明: 随干燥温度升高, 干燥时间显著缩短($p < 0.05$)。Page 方程能准确的描述老山芹热风干燥过程和干燥规律。60 °C热风干燥处理, 总多酚和总黄酮含量均显著高于其他干燥温度($p < 0.05$), 分别为 10.97 mg/g 和 3.45 mg/g, 并具有较强的抗氧化活性。60 °C干燥条件下老山芹所含的黄酮化合物组成含量和叶绿素 a 含量更高。因此, 热风干燥温度不同, 对老山芹干燥特性、总多酚、总黄酮、叶绿素含量、颜色及抗氧化活性影响显著不同($p < 0.05$)。综合考虑, 60 °C热风干燥老山芹在保证较快干燥速率的同时最大程度地保持成分和性质。

关键词: 老山芹; 热风干燥; 温度; 品质

文章编号: 1673-9078(2019)07-127-136

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.7.018

Effect of Hot-air Drying Temperature on the Quality of *Heracleum moellendorffii* Hance

CHAO Er-peng, ZHAO Yu-hong

(College of Forestry Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: The influences of different hot-air drying temperatures (40, 60, 80, 100 °C) on the drying characteristics (drying curve, drying rate curve, fitted drying equation), composition (total polyphenols, total flavonoids, chlorophyll), and properties (antioxidant activity, color changes) of *Heracleum moellendorffii* Hance were investigated in this study. The results showed that drying time was significantly ($p < 0.05$) reduced with an increase of temperature. The Page equation was found to describe accurately the hot air drying process and drying characteristics. Hot air drying at 60 °C led to significantly ($p < 0.05$) higher contents of total polyphenols and total flavonoids (10.97 and 3.45 mg/g, respectively) and higher antioxidant activities than at other temperatures. The contents of flavonoids and chlorophyll a in *Heracleum moellendorffii* Hance were also higher when drying was conducted at 60 °C. Therefore, hot-air drying at different temperatures exerted significantly ($p < 0.05$) different effects on the drying characteristics, content of total polyphenols, content of total flavonoids, chlorophyll content, color and antioxidant activity of *Heracleum moellendorffii* Hance. Taken together, hot-air drying at 60 °C could ensure a higher drying rate while maximally preserving the composition and properties of *Heracleum moellendorffii* Hance.

Key words: *Heracleum moellendorffii* Hance; hot-air drying; temperature; quality

老山芹 (*Heracleum moellendorffii* Hance) 是伞形科牛防风属植物, 学名东北牛防风^[1]。老山芹富含多种生物活性成分, 其中, 香豆素类化合物有抗病毒、抗菌活性^[2], 黄酮及多糖具有显著防癌作用^[3,4], 其嫩茎叶富含多种维生素、矿物质、蛋白质和多种氨基酸等营养成分具有食用保健价值^[5]。国内外对其研究集中在成分分析和功能性方面: Zhang 等^[6]研究表明老山芹甲醇提取物可改善胰岛素抗性, 从而具有抗糖尿

病活性。Gao 等^[7]分析出老山芹根中亲脂性化学成分主要为长链醇、甾醇和香豆素类化合物。赵玉红等^[8,9]分别用碱提法、醇提法、酸提法、水提法提取老山芹, 证明老山芹 80%乙醇提取物具有良好的抑制 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶效果。

老山芹主要生长于河岸湿草地等阴湿环境^[6], 含水量高、质地鲜嫩, 收获后易腐烂变质, 不易进行贮藏和运输。因此有必要找到一种处理方法, 在延长其保质期的同时最大限度地保留其成分和性质。干燥是除去新鲜食品原料中水分、延长其保质期的主要加工手段, 干燥制品的低水分活度能够抑制导致原料腐败变质的微生物的生长和繁殖, 并使水分介导的变质反应达到最小化。干燥可以显著减轻食品原料质量和体

收稿日期: 2019-01-14

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目 (2016YFC0500307-07)

作者简介: 绰尔鹏 (1996-), 女, 本科, 研究方向: 林下资源精深加工

通讯作者: 赵玉红 (1968-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 林下资源精深加工

加工

积,最大限度地减少包装、贮藏和运输成本^[10]。干燥产品的质量取决于所采取的干燥方式,不适宜的干燥方式会破坏原料中的活性物质^[11]。和冷冻干燥等方法相比,常压热风干燥仍是目前蔬菜脱水最常采用的方法,具有加工成本低、加工数量大的优点,但此法对产品质量影响较大。Silvana 等^[12]研究了不同热风干燥温度对苹果皮抗氧化能力的影响。Magdalini 等^[13]研究了不同干燥温度对芦荟功能性物质活性的影响。Guo 等^[14]研究了香菇的热风过程及干燥特性。Wilton 等^[15]建立了香蕉热风干燥动力学模型。而采用热风干燥法制备脱水老山芹加工制品及有关干燥温度对老山芹干燥特性、成分和性质的影响鲜有报道。

本文通过在不同热风干燥温度下对老山芹进行处理,研究其干燥特性变化,分析温度对总多酚、总黄酮、叶绿素等成分影响,评价温度对颜色、抗氧化性活性等性质的影响,从而确定适宜的热风干燥条件,为老山芹相关研究奠定基础,为老山芹的综合利用和深度开发提供依据。

1 材料与方法

原料:老山芹全株植物采自于黑龙江省加格达奇农林科学院基地,全部原材料均在长宽为 1 m 的正方形标记中采摘,生长周期为 7~10 d,4 月份采收总长度为 20 cm(根部距离叶片尖端)全株老山芹。

主要试剂:邻苯三酚、水杨酸、硫酸亚铁、氢氧化钠、磷酸盐、铁氰化钾、三氯乙酸、三氯化铁、盐酸、无水乙醇、甲酸、碳酸钠、磷酸盐缓冲液(phosphate buffered saline, PBS)、福林-酚试剂、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)和 2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐(ABTS)均为分析纯,没食子酸标准品、芦丁标准品、山奈酚标准品、槲皮素标准品、金丝桃苷标准品、冰醋酸和甲醇为色谱纯。

主要仪器:ALC-210.2 电子天平,北京赛多利斯仪器系统有限公司;JA-2003 型分析天平,上海良品仪器有限公司;Sz-4 型旋转蒸发器,沈阳莱柏利德有限公司;TDL-5W 型台式低速离心机,湖南星科科学仪器有限公司;KQ-300D 数控超声波清洗器,昆明市超声仪器有限公司;DK-S12 型电热恒温水浴锅,上海森信试验仪器有限公司;TDC-P3 全自动测色色差仪,北京市兴光测色仪器公司;FW177 型中草药粉碎机,天津市泰斯特仪器有限公司;DHG-9030A 电热恒温鼓风干燥箱;LC2000 液相色谱仪,上海天美科学仪器有限公司。

1.1 试验方法

1.1.1 老山芹干燥处理

去除老山芹根部以及残叶等不可食用部分,准确称取老山芹全株,将其均匀平铺在托盘上,每次载量 50 g,薄层厚度 4.0 mm,恒定风速 0.5 m/s,调节电热恒温鼓风干燥箱温度分别至 40、60、80、100 °C,当干燥箱内的温度达到设定值时,将样品放入干燥箱内进行热风干燥。每间隔 0.5 h 称量一次其质量,至样品接近水分平衡为止(即当水分含量为 7%时停止干燥),每次试验重复三次,取平均值。置于干燥器中备用。室温干燥老山芹所处实验室环境温度 25 °C,相对湿度 50%。使用 FW177 型中草药粉碎机粉碎完全干燥后的样品,粉末过 60 目筛。

1.1.2 老山芹干燥特性测定

水分含量测定:按照 GB 50093-2010 测定。

干基含水率测定:

$$M_t = \frac{G_t - G_g}{G_g} \quad (1)$$

式中: G_t 为 t 时刻老山芹的质量, g; G_g 为老山芹干重, g。

干燥速率测定:

$$DR = \frac{(M_t - M_{t+dt})}{dt} \quad (2)$$

式中: DR 为干燥速率, g/(g·h); M_t 为干基含水量, g 水/g 干基; dt 为失去水分所需时间, h。

水分比计算:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (3)$$

式中: M_0 为初始干基含水率, g 水/g 干基; M_t 为老山芹 t 时刻的干基含水率, g 水/g 干基; M_e 为干燥达平衡时干基含水率, g 水/g 干基。

1.1.3 老山芹多酚化合物的提取

称取干燥的老山芹粉末,按料液比 1:25 加入 80% 乙醇提取液,在设定条件为 60 °C、100 W 下超声处理 30 min,取滤液即为老山芹多酚类物质提取液,测定总黄酮及总多酚含量。每组试验 3 组平行,试验结果为 3 组平行的平均值^[16]。

1.1.4 老山芹的总多酚含量测定

采用福林-酚比色法^[17]。精确量取不同干燥温度下老山芹提取液 0.1 mL 于 10 mL 容量瓶中,分别加水 6 mL,摇匀,精确加入 0.5 mL 福林酚试剂,充分摇匀,1 min 之后,加入 20%的 Na_2CO_3 溶液 1.5 mL,混匀,用蒸馏水定容至刻度,75 °C 水浴 10 min,自然冷却至室温,以相应试剂为空白,于 765 nm 处测定吸光度。以没食子酸为标品,相同方法作标准曲线,得线性回归方程为:

$$Y = 0.0068X + 0.0384 \quad (R^2 = 0.9886)$$

式中: X 为没食子酸溶液质量浓度, $\mu\text{g/mL}$, Y 为 $\text{OD}_{765\text{nm}}$ 值。计算结果以老山芹干基中含有相当于没食子酸的毫克数表示, 单位为 mgGAE/g DW 。

1.1.5 老山芹的总黄酮含量测定

采用 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3\text{-NaNO}_2$ 法^[18]。精密吸取黄酮提取液 1.0 mL 于 10 mL 比色管中, 加 5% NaNO_2 溶液 0.5 mL 摇匀放置 6 min, 再加 10% $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ 溶液 0.5 mL, 摇匀再放置 6 min, 加 4% NaOH 溶液 4 mL, 摇匀放置 15 min。以芦丁为标品, 相同方法作标准曲线, 得线性回归方程为:

$$Y=0.0031X+0.0016 \quad (R^2=0.9891)$$

式中: X 为芦丁溶液质量浓度, $\mu\text{g/mL}$, Y 为 $\text{OD}_{510\text{nm}}$ 值。计算结果以老山芹干基中含有相当于芦丁的毫克数表示, 单位为 mg RE/g DW 。

1.1.6 老山芹黄酮组分定性分析

采用高效液相色谱 (HPLC)^[19] 对老山芹黄酮的组成进行定性分析。

1.1.6.1 色谱条件

液相色谱分离条件: 柱填料为 Sinocrom ODS-BP 5 μm , (4.6 mm $\times$ 150 mm)

洗脱流动相组成, A 溶剂为水, B 溶剂为甲醇溶液。流动相洗脱程序采用混合溶剂梯度洗脱的方式如表 1 所示。

表 1 混合溶剂洗脱表

Table 1 Mixed solvent elution table

时间/min	0	11	16	23	33	60	65	70	75
水	95	85	83	77	70	50	50	95	95
甲醇	5	15	17	23	30	50	50	5	5

紫外检测器: 检测波长 360 nm, 进样量: 5 μL , 流速: 0.8 mL/min, 柱温: 40 $^{\circ}\text{C}$ 。

1.1.6.2 对照品溶液的制备

对照品溶液的制备: 精密称取芦丁、金丝桃苷、槲皮素和山柰素对照品适量, 加甲醇制成每 1 mL 含芦丁、金丝桃苷、槲皮素和山柰素分别为 38.06 μg , 162.65 μg , 53.93 μg , 4.994 μg 的混合对照品溶液。

1.1.7 老山芹的抗氧化指标测定

1.1.7.1 DPPH 自由基清除能力的测定

根据文献^[20], 配制 DPPH 乙醇溶液 0.1 mmol/L, 取 0.1 mL 不同热风温度干燥的老山芹提取液加入 1.4 mL 无水乙醇, 之后再加入 1.0 mL DPPH 溶液充分混匀, 60 min 室温避光反应, 517 nm 处测定其吸光度。进行 3 次平行实验, 取平均值。清除率计算公式为:

$$I = (1 - \frac{A_i - A_c}{A_o}) \times 100\% \quad (4)$$

其中: I 为自由基清除率%; A_i 为 0.1 mL 样品液+1.4 mL

无水乙醇+1.0 mL DPPH 的吸光度; A_c 为 0.1 mL 样品液+2.4 mL 无水乙醇的吸光度; A_o 为 1.5 mL 无水乙醇+1.0 mL DPPH 的吸光度。

1.1.7.2 ABTS 自由基清除能力的测定

根据文献^[21], 精确称取 0.0384 g ABTS 用蒸馏水溶解并定容到 10 mL 和 0.0134 g 过硫酸钾定容到 10 mL, 将两种试剂经 1:1 均匀混合 12 h 避光后得 ABTS 储备液。使用前将 ABTS 储备液用磷酸盐缓冲液稀释成 ABTS 工作液, 要求在 30 $^{\circ}\text{C}$ 、734 nm 波长下吸光度为 0.70 ± 0.02 。将不同温度干燥下老山芹样品用甲醇配制一定浓度浓度, 取 0.15 mL 样品加入 2.85 mL ABTS 工作液, 混合均匀, 避光放置 10 min 后, 在 734 nm 处测定吸光度。进行 3 次平行实验, 取平均值。清除率计算公式为:

$$I = (1 - \frac{A_{\text{sample}}}{A_{\text{control}}}) \times 100\% \quad (5)$$

其中: I 为自由基清除率%; A_{control} 为 2.85 mL ABTS+溶液与 0.15 mL 甲醇混合后的吸光度; A_{sample} 为 2.85 mL ABTS+溶液与 0.15 mL 样品混合后的吸光度。

1.1.7.3 对 $\cdot\text{OH}$ 清除能力的测定

采用水杨酸捕获法测定抗氧化性^[22]。将 2 mL 9 mmol/L FeSO_4 , 2 mL 9 mmol/L 水杨酸-乙醇溶液, 加入到 2 mL 试样液中, 再加入 2 mL 8.8 mmol/L H_2O_2 , 于 37 $^{\circ}\text{C}$ 启动反应, 反应 0.5 h, 以蒸馏水为参比, 在 510 nm 下测定各反应体系的吸光度; 同时以 2 mL 9 mmol/L FeSO_4 , 2 mL 9 mmol/L 水杨酸及 2 mL 不同浓度的试样液为本底吸收。进行 3 次平行实验, 取平均值。清除率计算公式为:

$$I = (1 - \frac{A_i - A_j}{A_c}) \times 100\% \quad (6)$$

其中: I 为自由基清除率%; A_c 为空白对照液的吸光度; A_i 为加入样品溶液后的吸光度; A_j 为不加 H_2O_2 溶液本底吸光度。

1.1.7.4 对超氧阴离子自由基清除作用的测定

采用邻苯三酚自氧化法测定抗氧化性^[23]。试管中依次加入 0.05 mol/L (pH 8.2) 的 Tris-HCl 缓冲液 4.5 mL 和经不同热风温度干燥下的老山芹样液 0.4 mL (空白管以 0.4 mL 蒸馏水代替), 充分混匀后于 25 $^{\circ}\text{C}$ 水浴恒温 25 min, 加入 8 mmol/L 的邻苯三酚溶液 1.0 mL, 迅速混匀, 准确反应 4 min 后加入浓 HCl 两滴溶液终止反应, 于 325 nm 下测定吸光度; 进行 3 次平行实验, 取平均值。清除率计算公式为:

$$I = (1 - \frac{A_i - A_j}{A_c}) \times 100\% \quad (7)$$

其中: I 为自由基清除率%; A_c 为空白对照液的吸光度;

A_i 为加入样品溶液后的吸光度; A_j 为不加邻苯三酚溶液的本底吸光度。

1.1.8 老山芹的叶绿素含量测定

根据文献^[24-26], 称取不同干燥温度的老山芹粉末, 按料液比 1:25 加入 80%丙酮, 少许 CaCO_3 和石英砂, 研磨匀浆。匀浆洗涤过滤至 10 mL 容量瓶中, 定容得叶绿素提取液。取 5 mL 提取液置于 25 mL 容量瓶中, 用 80%丙酮定容至 25 mL 得待测液, 分别在波长 470 nm、646 nm、663 nm 波长处测定吸光值, a_0 分别测定三次。按照下面公式计算, 其中 C_a 、 C_b 、 C 分别为叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素的浓度, $A_{470\text{ nm}}$ 、 $A_{646\text{ nm}}$ 、 $A_{663\text{ nm}}$ 分别为提取液在波长 470 nm、646 nm 和 663 nm 条件下的吸光度。叶绿素的含量以每克老山芹中所含相应的叶绿素量表示, 单位 $\text{mg}/100\text{ g DW}$, 重复测定 3 次。

$$C_a = 12.21A_{663} - 2.81A_{646} \quad (8)$$

$$C_b = 20.13A_{646} - 5.03A_{663} \quad (9)$$

$$C = C_a + C_b \quad (10)$$

1.1.9 老山芹颜色测定

采用 L^* 、 a^* 、 b^* 色度体系测定样品^[27]。取经过同一热风干燥温度条件下处理的老山芹粉碎 5 次, 每次分别做成一个样品, 即经过同一热风干燥条件处理的老山芹粉碎后制成 5 个样品, 直接用自动色差仪测定 10 次样品表面的亮度值 L^* 、红度值 a^* 和黄度值 b^* , 分别求其平均值。室温自然干燥下的老山芹磨碎, 作为对照。色差值 ΔE 按以下公式计算, 表示干燥后样品与对照间的颜色差值。公式中 L_0 、 a_0 和 b_0 为新鲜老山芹测定值, L^* 、 a^* 和 b^* 为干燥后样品测定值。

$$\Delta E = \sqrt{(L_0 - L^*)^2 + (a_0 - a^*)^2 + (b_0 - b^*)^2} \quad (11)$$

1.1.10 数据处理

采用 SPSS1 9.0 软件对实验数据统计处理, 在 $p < 0.05$ 水平上对数据进行显著性分析; 所有分析图均采用 Origin 9.0 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 老山芹的干燥特性

2.1.1 温度对老山芹干燥特性的影响

通过干燥曲线和干燥速率曲线研究不同热风干燥温度对老山芹干燥特性的影响, 结果如图 1 所示。老山芹的干基含水率随干燥时间的延长而呈持续下降趋势, 且热风温度越高, 干基含水率下降越快。通过对比不同热风温度的影响, 发现热风干燥温度越高, 相同干燥时间老山芹片的干基含水率就越低, 干基含水

率下降速率越快, 到达安全含水率所需时间越短, 反之越长(图 1a)。这是由于干燥温度越高, 传热动力越大, 老山芹内部所含水分蒸发速率快, 干燥时间越短。

老山芹热风干燥过程大致可分为加速干燥阶段、恒速干燥阶段和降速干燥阶段, 老山芹的整体热风干燥过程以降速阶段为主, 加速阶段和恒速阶段的时间都较短, 可能的原因是当温度较高时, 老山芹表面和内部的水分蒸发速度较快, 干燥速率达到最大, 随着老山芹所含水分的减少, 其干燥速率也就随之降低。当热风干燥温度为 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 干燥初期呈瞬时增速阶段, 经过 3 h 达到安全含水率, 比热风干燥温度为 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 时达到安全含水率时间缩短 1.6 倍(图 1a)。即干燥温度越高, 干燥速率越快, $100\text{ }^\circ\text{C}$ 时老山芹的干燥速率最快。研究结果与芹菜^[28]、橙皮^[29]等蔬果干燥特性^[30]相一致。

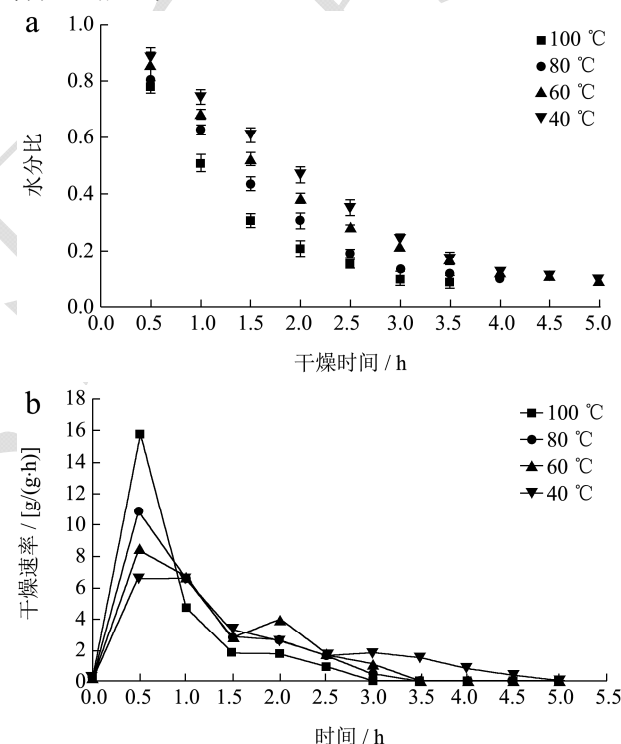


图 1 不同热风干燥温度对老山芹干燥特性的影响

Fig.1 Effects of drying temperatures on drying characteristics of *Heracleum moellendorffii* Hance

注: a: 不同温度下老山芹热风干燥水分比 MR-时间曲线; b: 不同温度下热风干燥速率曲线。

2.1.2 干燥模型拟合

干燥动力学是理解和控制干燥过程非常重要的参数。根据对实验结果进行统计分析以及拟合分析(图 2)得 $\ln(-\ln(\text{MR}))$ 与 $\ln t$ (图 2a~2d)更接近线性关系, 因此选用 Page 模型描述老山芹热风干燥特性, 与相关文献^[31]研究结果一致, 即 Page 模型适用于水果蔬菜热风干燥过程。

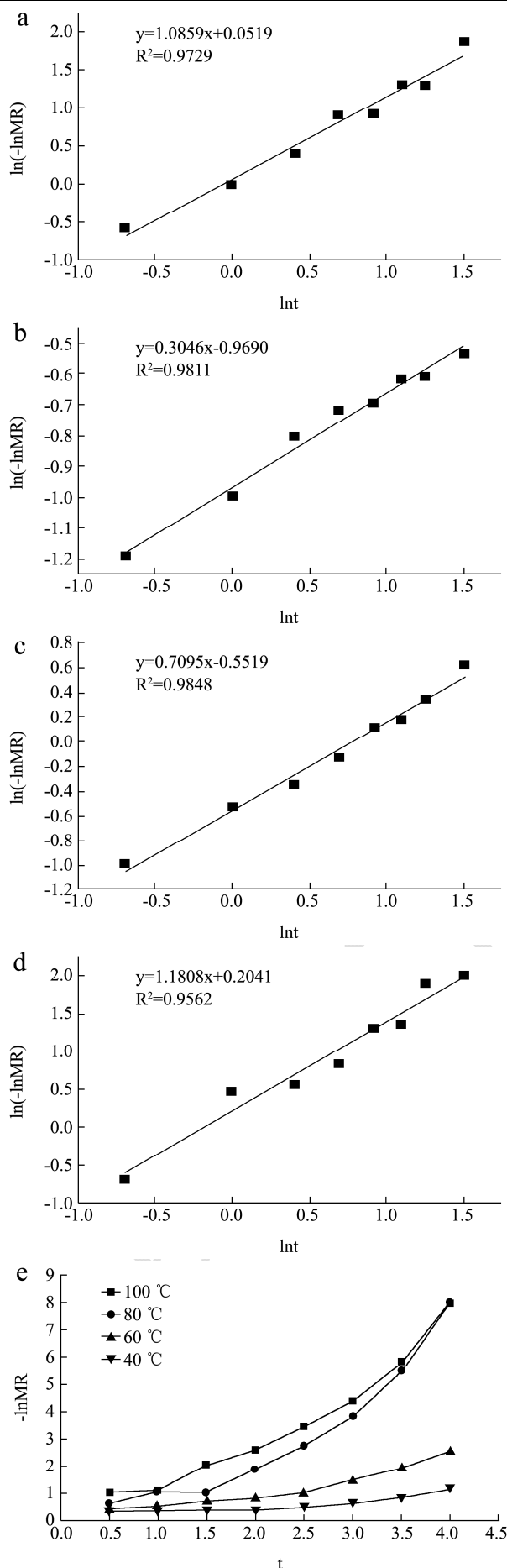


图2 干燥模型拟合曲线及拟合结果验证

Fig.2 Drying model fitting curves and fitting result verification

注: a: 40 °C $\ln(-\ln MR)$ - $\ln t$ 曲线; b: 60 °C $\ln(-\ln MR)$ - $\ln t$ 曲线; c: 80 °C $\ln(-\ln MR)$ - $\ln t$ 曲线; d: 100 °C $\ln(-\ln MR)$ - $\ln t$ 曲线; e: 不同温度下 $-\ln MR$ - t 曲线; f: 实验值与预测值的比较。

Page 模型中参数 k 和 n 均随着温度的变化呈线性变化趋势, 且决定系数 R^2 在 0.95 以上, 说明拟合度较好。将方程中的常数 k 和 n 用一元三次式拟合, 得到以下两个式子:

$$k=a+a_1T+a_2T^2+a_3T^3 \quad (12)$$

$$n=b+b_1T+b_2T^2+b_3T^3 \quad (13)$$

式中: T 为温度, 单位为 °C, a 、 a_1 、 a_2 、 a_3 、 b 、 b_1 、 b_2 、 b_3 为待定模型系数。

利用 SPSS 19.0 软件对方程中的干燥参数 k 和 n 进行拟合, 拟合结果为:

$$k=2.8508-0.1381975T+0.002370375T^2-0.00001165T^3 \quad (14)$$

$$n=-0.8901+0.0384725T-0.000228375T^2+0.000000525T^3 \quad (15)$$

由此可以得到老山芹热风干燥回归方程为:

$$MR=\exp(kt^n) \quad (16)$$

式中: $k=2.8508-0.1381975T+0.002370375T^2-0.00001165T^3$;
 $n=-0.8901+0.0384725T-0.000228375T^2+0.000000525T^3$ 。

2.1.3 模型验证

为检验回归方程与实验结果拟合的准确度, 选定一组数据进行检验, 实验条件为: 老山芹厚度 4.0 mm, 装料量 50 g, 热风干燥温度 60 °C。由 Page 方程在此条件下进行预测得出, Page 方程曲线和实验值拟合良好(图 2e), 表明 Page 方程能够较准确的描述老山芹热风干燥过程, 能够较正确的预测老山芹热风干燥规律。

2.2 干燥温度对老山芹总黄酮和总多酚含量的影响

由图 3 可知不同热风干燥温度对老山芹中总黄酮和总多酚含量的影响。室温干燥处理的老山芹的总黄

酮含量为 3.085 mg RE/g DW, 总多酚含量为 8.33 mg GAE/g DW, 热风干燥处理老山芹总黄酮含量范围为 2.67~3.45 mg RE/g DW, 总多酚含量为 6.97~10.97 mg GAE/g DW。热风干燥温度从室温升高到 40 °C 时, 老山芹中总黄酮和总多酚含量的影响无显著差异 ($p>0.05$), 而热风干燥温度升高至 60 °C 时, 老山芹中总黄酮和总多酚含量的影响有显著提高 ($p<0.05$); 当 60 °C 热风温度下处理老山芹时, 总黄酮含量增至 3.45 mg RE/g DW, 总多酚含量增至 10.97 mg GAE/g DW。Rachna^[32]等研究表明, 当样品处理温度超过 60 °C 时, 总黄酮和总多酚发生降解, 因此, 在实际加工的过程中需要严格控制老山芹干燥温度, 如果干燥温度过高会导致老山芹总多酚和总黄酮含量降低。

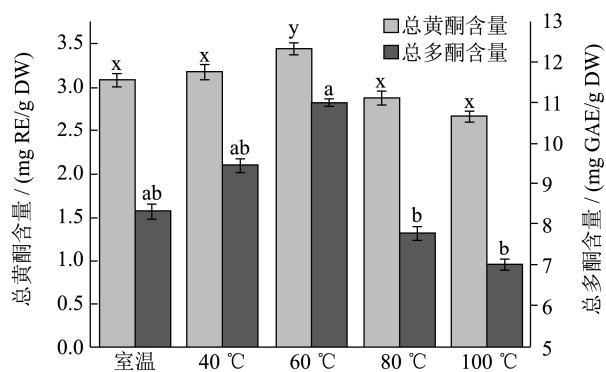


图3 热风干燥温度对老山芹总黄酮与总多酚的影响

Fig.3 The effect of different drying temperatures on the total flavonoids and total phenolic of *H. moellendorffii* Hance

注: 上标具有相同字母则表示无显著性差异 ($p>0.05$)。

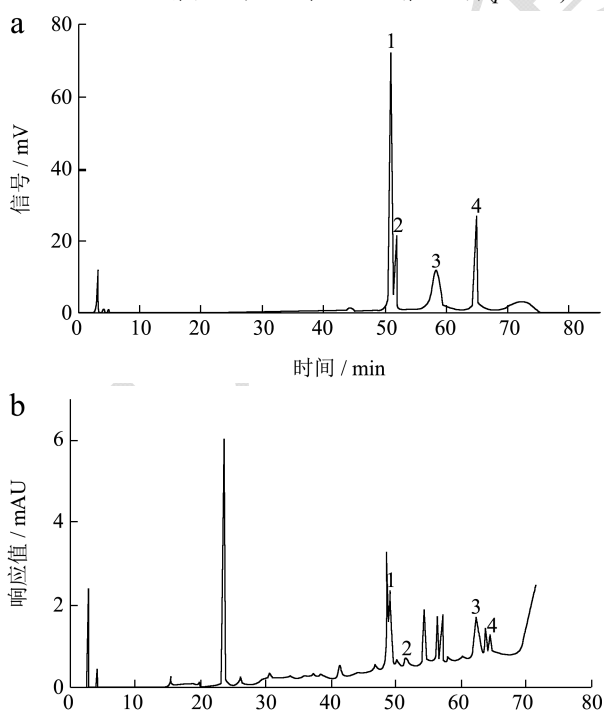


图4 老山芹样品色谱分离图

Fig.4 Sample chromatographic separation of figure of flavonoids from *Heracleum moellendorffii* Hance

注: 1: 芦丁, 2: 金丝桃苷, 3: 山奈酚, 4: 槲皮素; a: 混合对照品 HPLC 色谱图, b: 25 °C 样品 HPLC 色谱图, c: 40 °C 样品 HPLC 色谱图, d: 60 °C 样品 HPLC 色谱图, e: 80 °C 样品 HPLC 色谱图, f: 100 °C 样品 HPLC 色谱图。

2.3 不同干燥温度老山芹提取物中黄酮成分定性分析

在规定的高效液相色谱条件下,将标准溶液进样 10 μL 进行测定。其中,芦丁、金丝桃苷、山奈酚和槲皮素的出峰时间分别为: 51.480、51.812、58.686 和 64.033 min。

图 4a 为 4 种黄酮标准品在 330 nm 处的高效液相色谱图,图 4b~图 4f 为不同热风干燥温度(室温 40 $^{\circ}\text{C}$ 、60 $^{\circ}\text{C}$ 、80 $^{\circ}\text{C}$ 、100 $^{\circ}\text{C}$) 下的黄酮样品在 330 nm 处的高效液相色谱图,4 种黄酮类物质在 70 min 内均达到基线分离。通过与标准品色谱分离图对照,发现不同干燥温度处理的老山芹的黄酮类物质组成相同,分别为芦丁、金丝桃苷、山奈酚和槲皮素,其中,芦丁含量最高。

2.4 干燥温度对老山芹抗氧化性的影响

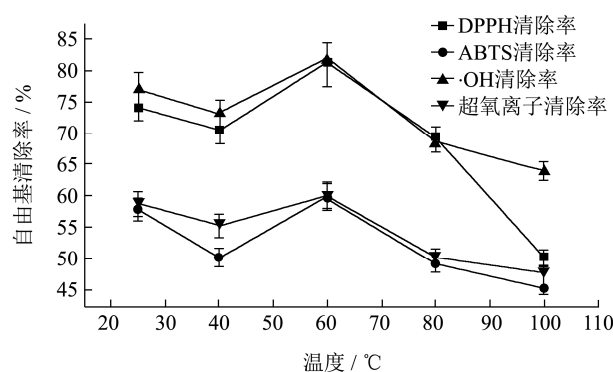


图 5 干燥温度对老山芹抗氧化能力的影响

Fig.5 The effect of drying temperature on antioxidant capacity of *Heracleum moellendorffii* Hance

同其他干燥温度相比,60 $^{\circ}\text{C}$ 条件下干燥的老山芹其提取物 DPPH 自由基清除率、ABTS 自由基清除率、·OH 自由基清除率、超氧离子清除率均最高(图 5),清除率分别为 81.19%、59.88%、81.99% 和 60.08%。随着老山芹中总多酚和总黄酮质量浓度的降低,自由基清除率逐渐降低,研究结果与 Meiyu Zheng^[33]研究表明总黄酮和总酚含量与自由基清除率之间有很强的相关性一致。陈欲云^[34]等研究表明芹菜黄酮质量浓度越大,清除·OH 自由基和超氧阴离子作用越强,与本实验干燥温度为 60 $^{\circ}\text{C}$ 时,总黄酮、总多酚含量最高,因此 DPPH 自由基清除率、ABTS 自由基清除率、·OH 自由基清除率、超氧离子清除率均最高这一实验结果一致。

2.5 干燥温度对老山芹叶绿素含量的影响

在不同热风干燥温度处理下,老山芹的叶绿素含量随加热处理温度的增加呈先上升后下降的趋势。室温自然干燥后老山芹总叶绿素含量最低,为 2.01 mg/g,60 $^{\circ}\text{C}$ 干燥处理后老山芹总叶绿素含量最高,为 8.84 mg/g,100 $^{\circ}\text{C}$ 干燥处理后老山芹总叶绿素含量降低至 4.66 mg/g(图 6)。樊昶昶等^[35]研究认为高温处理导致叶绿素蛋白复合体破坏,因此破坏了叶绿素稳定性。张琛^[36]等研究表明高温(≥ 60 $^{\circ}\text{C}$)促使降解速度加剧及自由基等物质对叶绿素的破坏作用,老山芹叶绿素含量下降可能是因为较高热风干燥温度使叶绿体类囊体构造受到伤害,使叶绿素的生物合成作用不断减弱,相应的叶绿素降解速度加快,最终表现出叶绿素含量减少的结果。其中,老山芹中叶绿素 a 含量随着热风干燥温度升高下降明显,叶绿素 b 与叶绿素 a 相比降解速率降解较小。老山芹叶绿素 a 含量变化呈现出明显的先升后降趋势,60 $^{\circ}\text{C}$ ~80 $^{\circ}\text{C}$ 时降解最显著($p < 0.05$),但叶绿素 b 含量基本没有很大变化。这与 Avan L^[37]的研究结果叶绿素 b 较叶绿素 a 对热处理有较高的耐受性一致。

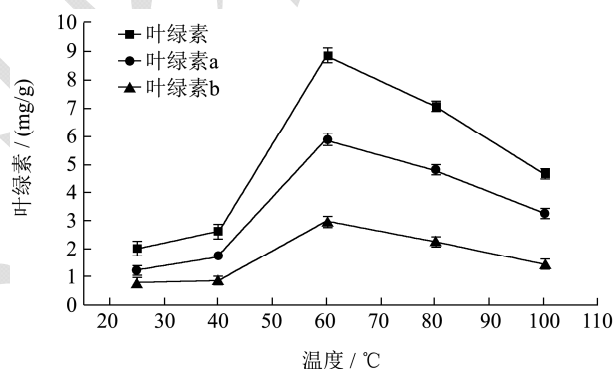


图 6 干燥温度对叶绿素含量的影响

Fig.6 The effect of drying temperature on the contents of chlorophyll of *Heracleum moellendorffii* Hance

2.6 干燥温度对老山芹颜色的影响

不同干燥温度处理的老山芹 CIELAB 值测量及色差值计算结果如表 2 所示。室温干燥样品 L* 值为 66.64,亮度最大;热风干燥为 100 $^{\circ}\text{C}$ 处理时 L* 值为 54.38,亮度最小;不同热风温度干燥处理后的老山芹 L* 值差异性不显著($p > 0.05$)。室温干燥样品 a* 值最大,呈深绿色;而热风干燥温度为 100 $^{\circ}\text{C}$ 时最小,呈浅绿色。随热风干燥温度升高,a* 值逐渐降低,说明样品的绿色逐渐变浅。同时,室温干燥 b* 值最大,说明不同的热风干燥温度处理的样品黄色均有所消退。室温干燥老山芹 L*、a*、b* 值最大,最接近新鲜老山芹的颜色,以室温干燥处理老山芹为对照,计算色差。室温干燥样品色差最小,而 100 $^{\circ}\text{C}$ 干燥样品色差最大

(表 2)。与其他干燥方式相比,老山芹在室温干燥过程中温度较低,故对老山芹的色素破坏程度较低,因此呈现的颜色与新鲜老山芹的颜色最接近。

表 2 不同干燥温度下老山芹的 CIELAB 值及色差

Table 2 The chromatic aberration and CIELAB value of *Heracleum moellendorffii* Hance under different drying temperatures

干燥方式	CIELAB 值			ΔE
	L*	a*	b*	
新鲜老山芹	69.76±0.21 ^d	-9.38±0.42 ^f	27.69±0.41 ^e	
室温干燥	66.48±0.09 ^c	-7.38±0.22 ^e	25.85±0.48 ^d	4.26±0.03 ^a
40℃热风干燥	64.88±1.17 ^b	-6.78±0.03 ^d	23.76±0.31 ^c	6.79±0.06 ^b
60℃热风干燥	64.65±0.14 ^b	-5.98±0.03 ^c	23.51±0.27 ^c	7.44±0.05 ^c
80℃热风干燥	62.41±0.57 ^a	-4.52±0.14 ^b	21.67±0.29 ^b	10.68±0.31 ^d
100℃热风干燥	61.89±0.32 ^a	-2.96±0.07 ^a	20.85±0.37 ^a	12.25±0.23 ^e

注: CIELAB 值表示为(平均值±标准差),上标具有相同字母则表示无显著性差异($p<0.05$)。

3 结论

不同热风干燥温度对老山芹干燥特性、成分和性质有显著影响。老山芹热风干燥过程及干燥规律可以用 Page 方程较准确地描述。60℃热风干燥处理老山芹的总黄酮和总多酚含量均显著增加。此温度下,老山芹抗氧化性最强、总叶绿素含量最高,且保持良好色泽。因此,60℃热风干燥老山芹在保证较快干燥速率的同时最大程度地保持老山芹成分、颜色和抗氧化性。

参考文献

[1] 信小娟,刘成学,李玉成.大兴安岭山野菜老山芹栽培技术[J].防护林科技,2016,48(8):120-121
XIN Xiao-juan, LIU Cheng-xue, LI Yu-cheng. Cultivation techniques of *Heracleum dissectum* in Daxinganling mountain wild vegetable [J]. Protection Forest Science and Technology, 2016, 48(8): 120-121

[2] 孔令雷,胡金凤,陈乃宏.香豆素类化合物药理和毒理作用的研究进展[J].中国药理学通报,2012,28(2):165-168
KONG Ling-lei, HU Jin-feng, CHEN Nai-hong. Advances in pharmacology and toxicology of coumarins [J]. Chinese Pharmacological Bulletin, 2012, 28(2): 165-168

[3] 蒋欣梅,王金华,于锡宏,等.不同海拔高度对老山芹营养成分及形态的影响[J].东北农业大学学报,2017,48(5):21-27
JIANG Xin-mei, WANG Jin-hua, YU Xi-hong, et al. Effect of different altitude on nutrients and character indexes of *Heracleum dissectum* Ledeb [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2017, 48(5): 21-27

[4] 李富恒,刘增兵,崔巍金琦,等.老山芹生长发育规律及主要性状相关性分析[J].东北农业大学学报,2017,48(1):15-22, 32

LI Fu-heng, LIU Zeng-bing, CUI Wei-jinqi, et al. Growth and development rule and correlation analysis of main characters of *Heracleum moellendorffii* Hance [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2017, 48(1): 15-22

[5] 刁绍起,朱楠楠,孙广仁.山芹菜营养成分分析与加工特性[J].东北林业大学学报,2010,38(10):48-50
DIAO Shao-qi, ZHU Nan-nan, SUN Guang-ren. Nutrients and processing characteristics of *Spuriopimpinella brachycarpa* [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2010, 38(10): 48-50.

[6] Zhang H L, Mi J, Peng Y J, et al. A new semiterpenoid glycoside and a new benzofuran derivative glycoside from the roots of, *Heracleum dissectum* [J]. Phytochemistry Letters, 2017, 21: 256-259

[7] Gao Y, Liu Y, Wang Z G, et al. Chemical constituents of *Heracleum dissectum* and their cytotoxic activity [J]. Phytochemistry Letters, 2014, 10: 276-280

[8] 赵玉红,马捷,李佳启,等.老山芹不同溶剂提取物的活性成分及其促进细胞生长活性[J].现代食品科技,2018,34(6):39-45
ZHAO Yu-hong, MA Jie, LI Jia-qi, et al. Active ingredients and active function of extracts from *Heracleum moellendorffii* Hance by different solvents [J]. Modern Food Science and Technology, 2018, 34(6): 39-45

[9] 赵玉红,李佳启,马捷,等.老山芹降血糖功能成分提取及活性研究[J].食品工业科技,2018,39(16):177-182,207
ZHAO Yu-hong, LI Jia-qi, MA Jie, et al. Extraction and activity of hypoglycemic functional components from *Heracleum dissectum* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(16): 177-182, 207

[10] Wankhade P K, Sapkal R S, Sapkal V S. Drying characteristics of okra slices on drying in hot air dryer [J].

- Procedia Engineering, 2013, 51: 371-374
- [11] Ratti C. Hot air and freeze-drying of high-value foods: A review [J]. Journal of Food Engineering, 2001, 49(4): 311-319
- [12] Demarchi S M, Quintero Ruiz N A, Concellón Analía, et al. Effect of temperature on hot-air drying rate and on retention of antioxidant capacity in apple leathers [J]. Food & Bioproducts Processing, 2013, 91(4): 310-318
- [13] Krokida M, Pappa A, Agalio M. Effect of drying on Aloe's functional components [J]. Procedia Food Science, 2011, 1: 1523-1527
- [14] Xiao-Hui G, Chun-Yan X, Yu-Rong T, et al. Mathematical modeling and effect of various hot-air drying on mushroom (*Lentinusedodes*) [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(1): 207-216
- [15] Silva W P D, Silva C S E, Gama F J A, et al. Mathematical models to describe thin-layer drying and to determine drying rate of whole bananas [J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2013, 13(1): 67-74
- [16] 严建刚,张名位,杨公明,等.芹菜黄酮的提取条件及其抗氧化活性研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2005, 1:131-135
- YAN Jian-gang, ZHANG Ming-wei, YANG Gong-ming, et al. Extraction conditions of celery flavone and its antioxidative activity [J]. Jour. of Northwest Sci-Tech Univ. of Agri. and For. (Nat. Sci. Ed.), 2005, 1: 131-135
- [17] Li H, Wang X, Li Y, et al. Polyphenolic compounds and antioxidant properties of selected China wines [J]. Food Chemistry, 2009, 112(2): 454-460
- [18] 郭亚健,范莉,王晓强,等.关于 $\text{NaNO}_2\text{-Al}(\text{NO}_3)_3\text{-NaOH}$ 比色法测定总黄酮方法的探讨[J].药物分析杂志,2002,22(2): 97-99
- GUO Ya-jian, FAN Li, WANG Xiao-qiang, et al. Discussion about $\text{NaNO}_2\text{-Al}(\text{NO}_3)_3\text{-NaOH}$ colorimetry for determination of total flavonoids [J]. Journal of Drug Analysis, 2002, 22(2): 97-99
- [19] 赵玉红,翟亚楠,王振宇.樟子松树皮多酚的成分分析和结构鉴定[J].北京林业大学学报,2016,38(1):125-130
- ZHAO Yu-hong, ZHAI Ya-nan, WANG Zhen-yu. Composition analysis and structural identification of polyphenols from *Pinussylvestris* var *Mongolica* barks [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(1): 125-130
- [20] Oliveira G K F, Tormin T F, Sousa R M F, et al. DPPH radical for evaluation of antioxidant capacity [J]. Food Chemistry, 2016, 192: 691-697
- [21] Taruscio T G, Barney D L, Exon J. Content and profile of flavanoid and phenolic acid compounds in conjunction with the antioxidant capacity for a variety of northwest, *Vaccinium*, berries [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2004, 52(10): 3169-3176
- [22] 吴亚楠,鲁晓翔,连喜军,等.玉米须黄酮清除自由基活性的研究[J].食品研究与开发,2009,30(1):5-8
- WU Ya-nan, LU Xiao-xiang, LIAN Xi-jun, et al. Study on scavenging activity of free radicals by corn silk flavonoids [J]. Food Research and Development, 2009, 30(1): 5-8
- [23] 莫开菊,柳圣,程超.生姜黄酮的抗氧化活性研究[J].食品科学,2006,27(9):110-115
- MO Kai-ju, LIU Sheng, CHENG Chao. Study on antioxidant activity of the gingerfla [J]. Food Science, 2006, 27(9): 110-115
- [24] 刘茜茜,张秀玲,谢凤英,等.响应面优化刺老芽护绿的研究[J].食品工业,2016,37(06):129-133
- LIU Qian-qian, ZHANG Xiu-ling, XIE Feng-ying, et al. Research on response surface of optimization *Aralia elata* (miq.) seem's protection of chlorophy [J]. Food Industry, 2016, 37(6): 129-133
- [25] 王炬,张秀玲,高宁,等.响应面法优化老山芹护绿工艺[J].食品工业科技,2018,39(17):152-158,16
- WANG Ju, ZHANG Xiu-ling, GAO Ning, et al. Optimization of chlorophyll protection of *Heracleum moellendorffii* Hance by response surface methodology [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(17): 152-158, 166
- [26] 张秀玲,刘茜茜,柳晓晨,等.响应面法优化柳蒿芽护绿剂的研究[J].食品研究与开发,2016,37(21):199-203
- ZHANG Xiu-ling, LIU Qian-qian, LIU Xiao-chen, et al. Research on response surface optimization of *Artemisia integrifolia* L.'s keeping green agents [J]. Food Research and Development, 2016, 37(21): 199-203
- [27] 张倩钰,孙杰,郑炯.苹果片热风薄层干燥过程中颜色变化的动力学模型[J].食品工业科技,2015,36(24):137-141
- ZHANG Qian-yu, SUN Jie, ZHENG Jiong. Color change kinetics model of apple slices during hot-air thin drying [J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(24): 137-141
- [28] Zielinska M, Ropelewska E, Zapotoczny P. Effects of freezing and hot air drying on the physical, morphological and thermal properties of cranberries (*Vaccinium macrocarpon*) [J]. Food and Bioproducts Processing, 2018, 110: 40-49
- [29] 丁胜华,王蓉蓉,李高阳,等.干燥温度对橙皮干燥动力学、酚

- 类物质及抗氧化特性的影响[J].中国食品学报,2016,16(11): 137-144
- DING Sheng-hua, WANG Rong-rong, LI Gao-yang, et al. Effects of drying temperature on the drying kinetics, phenolic acids, flavonoids, and antioxidant capacities of orange peels [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(11): 137-144
- [30] Velescu I, Tenu I, Murariu O C. Influence of air drying temperature on kinetics, physical properties and ascorbic acid content of fruits [J]. Journal of Biotechnology, 2014, 185: S84
- [31] Mrad N D, Boudhriouad Nourhène, Kechaou N, et al. Influence of air drying temperature on kinetics, physicochemical properties, total phenolic content and ascorbic acid of pears [J]. Food & Bioproducts Processing: Transactions of the Institution, 2012, 90(3): 433-441
- [32] Sehrawat R, Nema P K, Kaur B P. Quality evaluation and drying characteristics of mango cubes dried using low-pressure superheated steam, vacuum and hot air drying methods [J]. LWT, 2018, 92: 548-555
- [33] Zheng M, Xia Q, Lu S. Study on drying methods and their influences on effective components of loquat flower tea [J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 63(1): 14-20
- [34] 陈欲云,杨跃寰,蒋斌,等.芹菜总黄酮提取工艺的优化[J].四川理工学院学报(自然科学版),2013,26(5):19-22
- CHEN Yu-yun, YANG Yue-huan, JIANG bin, et al. Optimization of extraction technology of total flavonoids in celery [J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering, 2013, 26(5): 19-22
- [35] 樊昶昶,熊新星,邹亚红,等.热处理对菠菜和上海青类囊体膜及叶绿素稳定性的影响[J].中国食物与营养,2017,23(4): 30-34
- FAN Chang-chang, XIONG Xin-xing, ZOU Ya-hong, et al. Effects of thermal treatment on stability of thylakoid membrane and chlorophyll of spinach and *Brassica chinensis* [J]. Food and Nutrition in China, 2017, 23(4): 30-34
- [36] 张琛,孙丰婷,胡舰,等.小麦苗叶绿素在食品加工因素中的稳定性分析[J].食品研究与开发,2018,39(5):7-11
- ZHANG Chen, SUN Feng-ting, HU Jian, et al. Analysis of the stability of wheat seedling chlorophyll in food processing [J]. Food Research and Development, 2018, 39(5): 7-11
- [37] Van Loey A, Ooms V, Weemaes C, et al. Thermal and pressure-temperature degradation of chlorophyll in broccoli (*Brassica oleracea* L. italica) juice: A kinetic study [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1998, 46(12): 5289-5294
-
- (上接第 204 页)
- [23] Moraes C C, De Medeiros Burkert J F, Kalil S J. C-phycoyanin extraction process for large-scale use [J]. Journal of Food Biochemistry, 2010, 34: 133-148
- [24] 吴蕾,庞广昌,陈庆森.高压匀浆破碎螺旋藻细胞释放藻蛋白的研究[J].食品科学,2008,29(3):43-45
- WU Lei, PANG Guang-chang, CHEN Qing-sen. Study on the release of algin from *Spirulina platensis* cells by high-pressure homogenization [J]. Journal of Food Science, 2008, 29(3): 43-45
- [25] 熊勇,李冬梅,刘江波,等.响应面法分析优化藻蓝蛋白色素提取工艺的研究[J].中国食品添加剂,2018(11):107-112
- XIONG Yong, LI Dong-mei, LIU Jiang-bo, et al. Study on optimization of phycocyanin pigment extraction process by response surface methodology [J]. Chinese Journal of Food Additives, 2018(11): 107-112
- [26] 李思梦,高风正,曾名湧.聚球藻 7002 藻蓝蛋白的分离纯化研究[J].食品工业科技,2016,37(23):97-103
- LI Si-meng, GAO Feng-zheng, ZENG Ming-yong. Isolation and purification of phycocyanin from *polycoccus* 7002 [J]. Journal of Food Industry Science and Technology, 2016, 37(23): 97-103
- [27] ZHANG Fa-yu, YU Jin-wei. UV-Vis spectrum characteristics of phycocyanin purification in water from chao lake [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2017, 37(3): 806-810
- [28] 汪家权,张晓萌,张发宇.分段盐析法纯化藻蓝蛋白的紫外-可见光谱分析[J].食品科技,2017,11:253-260
- WANG Jia-quan, ZHANG Xiao-meng, ZHANG Fa-yu. UV Vis spectroscopic analysis of phycocyanin purification by segmented salting out method [J]. Food Science and Technology, 2017, 11: 253-260