

不同干燥条件下富硒魔芋颜色、葡甘聚糖及硒含量的研究

毕振举¹,谷云盈¹,闫 丽^{1*},夏曾润²

(1. 西北农林科技大学 林学院,陕西 杨陵 712100;2. 农业部 富硒产品开发与质量控制重点实验室 富硒食品开发国家地方联合工程实验室(陕西)安康市富硒产品研发中心,陕西 安康 725000)

摘 要:为选择合适的富硒魔芋干燥技术,通过国际照明委员会(commission internationale de l' eclairage,CIE)色度学系统和紫外分光光度法,研究了自然干燥、热风干燥、真空冷冻干燥 3 种干燥技术对富硒魔芋颜色、葡甘聚糖含量、硒含量的影响。结果表明,不同干燥技术对富硒魔芋的颜色、葡甘聚糖含量、硒含量有显著影响。自然干燥、热风干燥和真空冷冻干燥对葡甘聚糖颜色影响程度递减,真空冷冻干燥前后魔芋的总体色差(ΔE^*)最小,为3. 826 2,真空冷冻干燥技术能最大程度保持富硒魔芋颜色;自然干燥、热风干燥和真空冷冻干燥条件下富硒魔芋中葡甘聚糖含量依次增多,真空冷冻干燥条件下富硒魔芋的葡甘聚糖含量达到 54. 8%;自然干燥、热风干燥和真空冷冻干燥条件下富硒魔芋中总硒和有机硒含量依次减少,自然干燥条件下富硒魔芋总硒和有机硒含量分别达到 $1. 651 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $1. 365 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$,而真空冷冻干燥条件下富硒魔芋中无机硒含量最多,为 $0. 396 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。采用真空冷冻干燥可以减小干燥前后富硒魔芋颜色变化,提高干燥后富硒魔芋中葡甘聚糖和无机硒含量。

关键词:富硒魔芋;干燥;硒含量;颜色;葡甘聚糖含量

中图分类号:S632. 3 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2020)03-0207-05

Effects of Different Drying Methods on the Color,Glucomannan and Selenium Contents of Selenium-enriched Konjac Tuber

BI Zhen-ju¹,GU Yun-ying¹,YAN Li^{1*},XIA Zeng-run²

(1. College of Forestry,Northwest A&F University,Yangling 712100,Shaanxi,China; 2. Key Laboratory of Se-enriched Products Development and Quality Control,Ministry of Agriculture and Rural Affairs,National-Local Joint Engineering Laboratory of Se-enriched Food Development ,Ankang R&D Center for Se-enriched Products, Ankang 725000,Shaanxi,China)

Abstract:In order to select suitable drying techniques for the tubers of selenium-enriched konjac (*Amorphophallus konjac*), the effects of air drying (AD), hot air drying (HAD) and vacuum freeze drying (VFD) on the color,glucomannan and selenium contents of selenium-enriched konjac tubers were studied by CIE standard colorimetric system and ultraviolet spectrophotometry. The results showed that different drying techniques had significant effects on the color,glucomannan and selenium contents. The color of the dried products from deep to light was AD,HAD,and VFD. The variation of total value of chromatism (ΔE^*) of VFD product was smallest,with the difference of 2. 524,indicating that VFD could maintain the original color of the konjac tuber to the maximum extent. The content of glucomannan increased after dried by the three techniques,and the amount of increment was in the order of AD>HAD>VFD,in which the content of glucomannan with VFD reached 54. 8%. The contents of total selenium and organic selenium with three drying techniques were in the order of AD>HAD>VFD,in which the contents of total and or-

收稿日期:2019-09-05 修回日期:2019-09-17
基金项目:中国富硒产业研究院富硒专项科技计划“富硒魔芋超低温冷冻干燥关键技术研究”(2018XZX04-02)。
作者简介:毕振举。研究方向:生物质材料高值化利用。E-mail:fhgc1314bzj@163. com
* 通信作者:闫 丽,副教授,硕士生导师。研究方向:木质材料保护与功能性改良。E-mail:liliyan@nwsuaf. edu. cn

ganic-form selenium with AD were 1. 651 and 1. 365 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, respectively. However, the content of inorganic selenium with VFD was highest: 0. 396 $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$. VFD can reduce the color change of konjac tuber and increase the content of glucomannan.

Key words: selenium-enriched konjac (*Amorphophallus konjac*); drying; selenium content; color; glucomannan content

魔芋(*Amorphophallus konjac*)为天南星科魔芋属多年生宿根性草本植物,主要分布于中国、日本和东南亚地区。魔芋块茎中含有 64. 78%的魔芋葡甘聚糖(konjac glucomannan)^[1],葡甘聚糖具有调节糖、胆固醇脂质代谢^[2]、抗癌和清理肠道^[3]、抗细胞老化等药理作用和生物活性功能,越来越受到人们的关注^[4]。陕西安康和湖北施恩富硒魔芋富含人体必需的微量元素硒^[5],具有防癌、抗癌、治疗克山病和大骨节病、增强人体抵抗力等诸多功效^[6]。富硒魔芋在食品和医药领域具有较高的开发利用价值。

魔芋中含有大量热敏性的多酚类物质和多酚氧化酶,受到热量和氧等因素的影响会发生严重的氧化褐变现象^[7],因此魔芋采集后要尽快进行干燥处理。目前,魔芋干燥加工多采用自然晒干和燃煤热风干燥的方法,在干燥过程中由于多酚类物质和多酚氧化酶的氧化影响了魔芋颜色^[8]。颜色的变化间接反映了干燥过程中魔芋活性成分的变化,R. Impaprasert *et al*^[9]对热风干燥和微波真空干燥条件下魔芋的颜色和葡甘聚糖的物理性质进行研究,发现热风干燥魔芋的白度指数明显高于微波真空干燥魔芋,并且经热风干燥的魔芋提取的葡甘聚糖溶液黏性比微波真空干燥有所降低。与其他干燥方法相比,真空冷冻干燥在低温、低氧下进行^[10],大多数生物反应停滞,使物料的原有结构、形状和颜色受到最小程度的破坏,因而可以最大程度保持食品品质。此外真空冷冻干燥还有存放时间长、便于长途运输等优点,近年来广泛应用于食品、医药等领域^[11-12]。而目前国内有关富硒魔芋真空冷冻干燥条件下活性成分的含量以及不同干燥方式对富硒魔芋葡甘和硒等活性成分含量影响的研究尚未见报道。

本研究探索了自然干燥、热风干燥和真空冷冻干燥 3 种方式对富硒魔芋的颜色及葡甘聚糖、硒含量的影响,为优化魔芋干燥工艺、提高魔芋产品质量和产品附加值提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

试验用 1 年生新鲜富硒魔芋样品,采自陕西省安康市。选择个体完整、无机械损伤的富硒魔芋去皮后切成尺寸为 80 mm(长)×80 mm(宽)×10 mm

(厚)的正方形切片。

苯甲酸(分析纯,洛阳昊华化学试剂有限公司),高氯酸(分析纯,国药集团化学试剂有限公司),甲苯(分析纯,洛阳昊华化学试剂有限公司),邻苯二胺(分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司),乙二胺四乙酸二钠(分析纯,广东省化工试剂工程技术研究开发中心),3,3-二氨基联苯胺(分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司),重蒸馏苯酚(分析纯,成都市科隆化学品有限公司),酒石酸钾钠(分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司),3,5-二硝基水杨酸(分析纯,国药集团化学试剂有限公司)。D(+)
·无水葡萄糖(标准品,上海源叶生物科技有限公司),高纯硒粉(标准品,上海阿拉丁生化科技股份有限公司)。其他均为分析纯,国产外购。

1.2 仪器与设备

DP-D501 型冷冻干燥机,无锡德谱仪器制造有限公司;UV-1200 型紫外可见分光光度计,上海美普达仪器有限公司;KAS-106 型标准微晶 COD 消解器,山东迪康环保科技有限公司;DM-40W102 型低温保存箱,澳柯玛股份有限公司;CS-820 台式分光测色仪,杭州彩谱科技有限公司;101-1AB 型电热鼓风干燥器,北京市中兴伟业仪器有限公司;SL02 型低速离心机,上海知信试验仪器技术有限公司;KQ5200DE 型数控超声波清洗器,上海生析超声仪器有限公司;LDZM 型立式压力蒸汽灭菌器,上海申安医疗器械厂。

1.3 试验方法

1.3.1 苯酚显色剂(DNS)的配置^[13] 将 6.9 g 结晶的重蒸馏苯酚溶解于 15.2 mL 10%的氢氧化钠溶液中,稀释至 69 mL,再加入 6.9 g 亚硫酸氢钠制备成 A 液。将 225 g 酒石酸钾钠加入到 300 mL 10%的氢氧化钠溶液中,再加入 880 mL 1%的 3,5-二硝基水杨酸溶液制备成 B 液。将 A 液与 B 液混合,置于棕色试剂瓶中,放入 4℃的冰箱中静置 7 d 后使用。

1.3.2 富硒魔芋样品干燥 将新鲜的富硒魔芋样品切片随机分成 3 组,每组 6 个重复样。第 1 组样品放置于实验室干燥通风处自然干燥至恒重,干燥时间 30 d,终含水率为 6.7%。第 2 组放置于电热鼓风干燥器中热风干燥至恒重,干燥温度 80℃、干

干燥时间 24 h,终含水率为 7.9%。第 3 组先放置于-37℃的低温保存箱中冷冻 2 h,然后放置于冷冻干燥机中干燥至恒重,真空度为 4.6 Pa,干燥温度-56℃、干燥时间 20 h,终含水率为 8.6%。

1.3.3 富硒魔芋样品颜色的测量 采用台式分光测色仪测量富硒魔芋样品的颜色参数,试样的色度学参数使用“国际照明委员会”空间色度坐标 CIE 的明度 L^* 、红绿轴色品指数 a^* 、黄蓝轴色品指数 b^* 值表示^[14]。取均值计算出明度差(ΔL^*)、色品指数差(Δa^* 、 Δb^*)和总体色差(ΔE^*)计算公式如下:

$$\Delta L^* = L^* - L_s^* \tag{1}$$

$$\Delta a^* = a^* - a_s^* \tag{2}$$

$$\Delta b^* = b^* - b_s^* \tag{3}$$

$$\Delta E^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{\frac{1}{2}} \tag{4}$$

式中: a^* 、 b^* 、 L^* 表示干燥后样品的颜色参数, a_s^* 、 b_s^* 、 L_s^* 表示未干燥样品的颜色参数。

1.3.4 富硒魔芋葡甘聚糖含量的测定

1.3.4.1 富硒魔芋葡甘聚糖测定液的制备 葡甘聚糖的提取方法和含量测定方法分别是超声辅助提取法和 DNS 法^[15]。将干燥后的富硒魔芋样品制备成 40 目的粉末,精确称取 0.2 g 于烧杯中,加 20.0 mL 石油醚,在超声波清洗器(40 kHz,100 W)中振荡 30 min 后放入 3 500 r·min⁻¹ 转速的低速离心机中离心 5 min,取下层沉淀即为脱脂后的魔芋粉。将脱脂干燥后的魔芋粉倒入烧杯中,加入 85% 的乙醇 50.0 mL,在超声波清洗器上超声处理 30 min 后过滤收集固体,重复 2 次得到除去还原糖的魔芋粉。

上述样品中加入 20.0 mL 蒸馏水,在温度为 40℃ 的超声波清洗器(40 kHz,100 W)上超声处理 60 min 后用蒸馏水补充至 60.0 mL,放入 3 500 r·min⁻¹ 转速的低速离心机中离心 10 min,吸取上清液即为葡甘聚糖提取液。精密移取 1.0 mL 葡甘聚糖提取液于磨口试管中,准确加入 0.5 mL 2.5 mol·L⁻¹ 的稀硫酸溶液,摇匀密闭后于立式压力蒸汽灭菌器 105℃ 温度下处理 2.5 h 后立即冷却,准确加入 0.5 mL 5.0 mol·L⁻¹ 的氢氧化钠溶液,摇匀后即为葡甘聚糖水解待测液。

1.3.4.2 建立葡萄糖标准曲线 准确称取 0.01 g 色谱纯 D(+)·无水葡萄糖溶于苯甲酸水中,定容至 10 mL。从中分别移取 0.4、0.8、1.2、1.6、2.0 mL 于容量瓶中,加蒸馏水补充至 2.0 mL,再在每个容量瓶中加入 2.0 mL DNS 显色剂,摇匀后放在沸水浴中加热 5 min 并立即冷却,用蒸馏水定容至 10.0 mL,摇匀后倒入 1 cm 比色皿。在紫外可见分光光度计的 556 nm 波长处测量其吸光度(A)。

以不同浓度葡萄糖工作液的吸光度为纵坐标、D(+)·无水葡萄糖浓度(mg·mL⁻¹)为横坐标绘制标准曲线(图 1)。

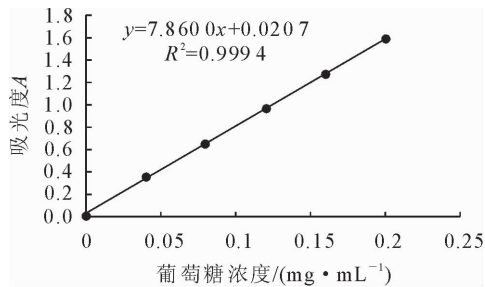


图 1 葡萄糖标准曲线

Fig. 1 Standard curve of glucose

1.3.4.3 样品葡甘聚糖测定 准确移取 2.0 mL 葡甘聚糖水解待测液于定容瓶中,加入 2.0 mL DNS 显色剂,在沸水浴中加热 5.0 min,冷却后用蒸馏水定容至 10.0 mL。与标准曲线在同一条件下进行测量,根据葡萄糖标准曲线和式(5)计算出样品中葡甘聚糖的含量,取均值。

$$C_{\text{样}} = \frac{CV}{WN} \times \epsilon \tag{5}$$

式中: $C_{\text{样}}$ 为样品中葡甘聚糖含量; C 为葡萄糖浓度(mg·mL⁻¹); W 为样品的质量(mg); V 为蒸馏水定容后样品的体积(mL); N 为用于分光光度计测定得的样品体积占制备测定液定容后样品的体积分数; $\epsilon=0.9$,为多糖的校正系数,是葡甘聚糖中葡萄糖和甘露糖残基分子量与其水解后生成的葡萄糖和甘露糖分子量之比。

1.3.5 富硒魔芋样品硒含量的测定

1.3.5.1 建立硒标准曲线 精确称取 0.1 g 高纯硒粉和 10.0 mL 浓硝酸于烧杯中水浴溶解,待冷却后转移到定容瓶中,加蒸馏水定容,配成 5 μg·mL⁻¹ 的硒标准品溶液。分别吸取 0.0、2.0、4.0、6.0、8.0、10.0 mL 的硒标准品溶液于定容瓶中,用蒸馏水稀释至 40.0 mL 后加入 1.0 mL、5% 乙二胺四乙酸二钠溶液,并用 1 mol·L⁻¹ 盐酸溶液调 pH 至 2.0。加入 2.0 mL 1% 邻苯二胺盐溶液混匀后在 50℃ 水浴锅内静置 40 min,用氨水溶液调节 pH 值至 7.0。然后加入 10.0 mL 甲苯,放于恒温摇床上震荡 10 min,移入分液漏斗中静置分层,取甲苯层于紫外可见分光光度计的 335 nm 波长处测量其吸光度,绘制标准曲线见图 2。

1.3.5.2 样品总硒含量测定 样品处理方法为超声波辅助消解法^[13],每份称取 0.5 g 干燥的富硒魔芋粉于锥形瓶中,加入 15.0 mL 混酸(硝酸:高氯酸=3:2),冷消化过夜后将锥形瓶放于温度为 160℃ 的微晶 COD 消解器上消解,待瓶中样品完全

消解且液体剩余体积不到 2.0 mL 时停止加热,冷却后向锥形瓶中加入盐酸(1:1)溶液 5.0 mL,置于 100℃沸水浴中加热 20 min,过滤,取滤液定容至 25.0 mL,即得样品硒待测液。待测液与标准曲线在同一条件下进行测量,根据硒标准曲线和(6)式计算出样品中总硒含量,取均值。

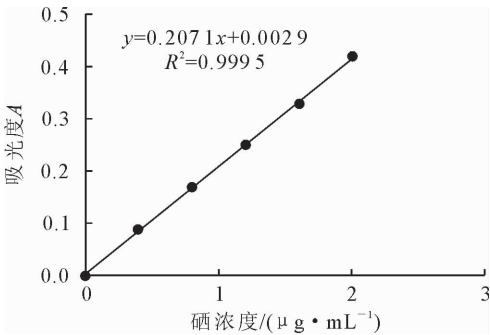


图 2 硒标准曲线
Fig. 2 Standard curve of selenium

$$C'_{\text{样}} = \frac{C'V'}{W'N'} \tag{6}$$

式中: $C'_{\text{样}}$ 为样品中硒含量($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$); C' 为根据标准曲线查得的硒浓度; W' 为样品的质量(g); V' 为甲苯萃取所得样品得体积; N' 为用于测定得样品体积占定容后样品的体积分数。

1.3.5.3 无机硒含量测定 取干燥的富硒魔芋粉 0.5 g 于 50.0 mL 蒸馏水中,置于超声波清洗器(40 kHz,100 W)中超声 30 min 后沸水浴加热 30 min,过滤,取滤液定容至 50.0 mL 后加入 10.0 mL 甲苯,震荡萃取 3 min,静置分层,取甲苯层在紫外可见分光光度计的 335 nm 波长处测量其吸光度。根据硒标准曲线和式(6)计算出样品中无机硒含量。

1.3.5.4 有机硒含量测定 有机硒含量用测定的

总硒含量减去样品中无机硒的含量可得。
1.3.6 统计分析 采用 SPSS 12.0 软件对试验数据进行单因素方差分析,显著水平 0.05。

2 结果与分析

2.1 不同干燥条件对样品颜色的影响

不同干燥条件下富硒魔芋的图片见图 3。方差分析结果表明,不同干燥技术对干燥前后富硒魔芋的明度差 ΔL^* ($P=0.000$)、黄绿轴色品指数差 Δb^* ($P=0.003$)和总体色差 ΔE^* ($P=0.000$)影响显著,对红绿色品指数差 Δa^* ($P=0.066$)影响不显著。不同干燥条件下富硒魔芋的颜色参数见图 4。3 种干燥条件下干燥前后富硒魔芋的明度差、红绿轴色品指数差、黄蓝轴色品指数差均为负值,表明干燥后富硒魔芋颜色偏暗、偏绿且偏蓝,数值越大,颜色偏差程度越大^[16]。热风干燥前后富硒魔芋的明度差最大($|\Delta L^*|=50.513$),偏暗程度最大,其次为自然干燥,真空冷冻干燥前后富硒魔芋的明度差最小($|\Delta L^*|=1.043$);3 种干燥条件下干燥前后富硒魔芋 $|\Delta a^*|$ 均较小,表明干燥后富硒魔芋颜色偏绿,但程度不大。冷冻干燥前后富硒魔芋的 $|\Delta a^*|$ 最大,为-1.867,其次为自然干燥和热风干燥,分别为-0.473和-0.428;热风干燥前后 $|\Delta b^*|$ 数值最大,自然干燥和真空冷冻干燥次之,分别为 6.173、2.535和1.341。热风干燥和冷冻干燥的富硒魔芋干燥前后的总体色差 ΔE^* 较大,分别为 50.564 和 26.824,真空冷冻干燥前后富硒魔芋 ΔE^* 最小,仅为3.627。综上所述,3 种干燥方式中,真空冷冻干燥前后富硒魔芋的 $|\Delta L^*|$ 、 $|\Delta b^*|$ 和 ΔE^* 值最小,说明真空冷冻干燥对富硒魔芋的颜色影响最小。

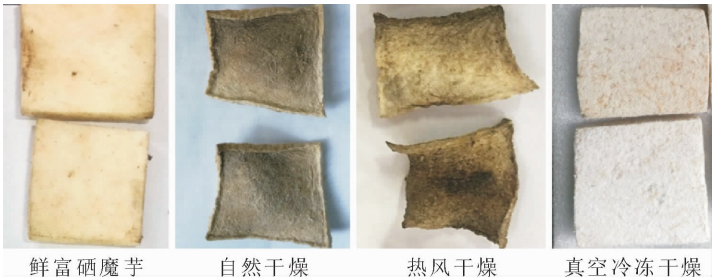


图 3 经自然干燥、热风干燥、真空冷冻干燥后的富硒魔芋颜色
Fig. 3 Color of selenium-enriched konjac after air drying, hot air drying and vacuum freeze drying

2.2 不同干燥条件对样品葡甘聚糖含量的影响

方差分析结果表明,不同干燥技术对干燥前后富硒魔芋葡甘聚糖的含量($P=0.002$)有显著影响,不同干燥条件下的富硒魔芋样品的葡甘聚糖含量见图 5。3 种干燥技术中真空冷冻干燥条件下富硒魔芋内葡甘聚糖含量最多,达到了 54.8%。自然干燥和热风干燥条件下富硒魔芋内葡甘聚糖含量较低,

分别为 40.8%和 38.9%。说明与自然干燥和热风干燥相比,真空冷冻干燥技术能提高葡甘聚糖的留存率,这是由于真空冷冻干燥的低温抑制了大部分微生物和酶的生物反应的进行。

2.3 不同干燥条件对样品硒含量的影响

方差分析结果表明,不同干燥技术对干燥前后富硒魔芋总硒含量($P=0.001$)、有机硒含量($P=$

0.001)和无机硒含量($P=0.001$)有显著影响(图 6)。不同的干燥技术对富硒魔芋硒留存率有不同影响。总硒和有机硒含量变化一致,自然干燥条件下的总硒和有机硒含量最多,这是由于自然干燥没有经过复杂的物理加工,硒损失较少。热风干燥条件下总硒含量和有机硒含量次之,真空冷冻干燥条件下总硒含量和有机硒含量最少,总硒和有机硒

含量仅为 $1.362\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $0.966\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。真空冷冻干燥方式样品无机硒含量最高,为 $0.396\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,自然干燥和热风干燥相同均为 $0.299\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。综上所述,自然干燥条件下富硒魔芋内硒的留存率最高,但耗时太长;热风和真空冷冻干燥条件下富硒魔芋内硒的留存率略低,真空冷冻干燥的富硒魔芋的无机硒含量最高。

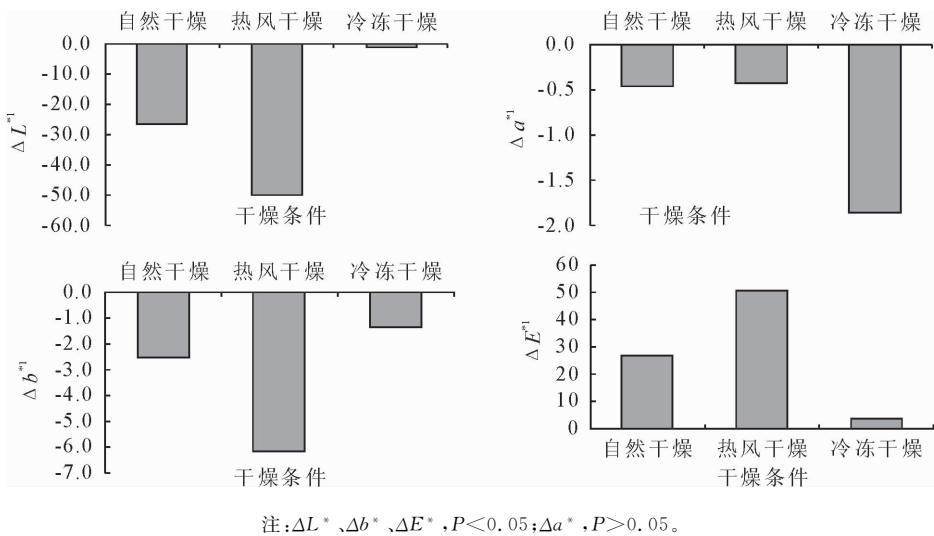


图 4 不同干燥条件对干燥前后富硒魔芋颜色参数的影响

Fig. 4 Effects of different drying conditions on color parameters of selenium-enriched konjac

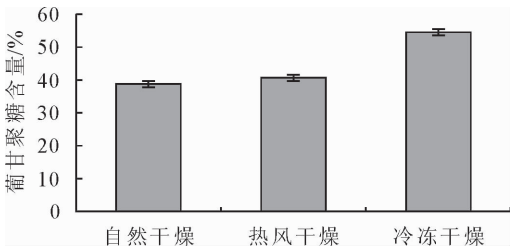


图 5 不同干燥条件下富硒魔芋葡甘聚糖的含量($P<0.05$)

Fig. 5 Contents of glucomannan in selenium-enriched konjac under different drying conditions

3 结论与讨论

自然干燥、热风干燥和真空冷冻干燥对富硒魔芋颜色的影响程度逐渐减小,真空冷冻干燥对富硒魔芋颜色影响程度最小;自然干燥、热风干燥和真空冷冻干燥条件下富硒魔芋葡甘聚糖含量逐渐增多,真空冷冻干燥条件下富硒魔芋的葡甘聚糖含量最高;自然干燥、热风干燥和真空冷冻干燥条件下富硒魔芋总硒和有机硒的含量逐渐降低,真空冷冻干燥条件下富硒魔芋中总硒和有机硒留存率最低而无机硒留存率最高。

采用真空冷冻干燥可以减小干燥前后富硒魔芋颜色变化,提高干燥后富硒魔芋中葡甘聚糖和无机硒的含量,对于富硒魔芋的干燥具有重要意义。

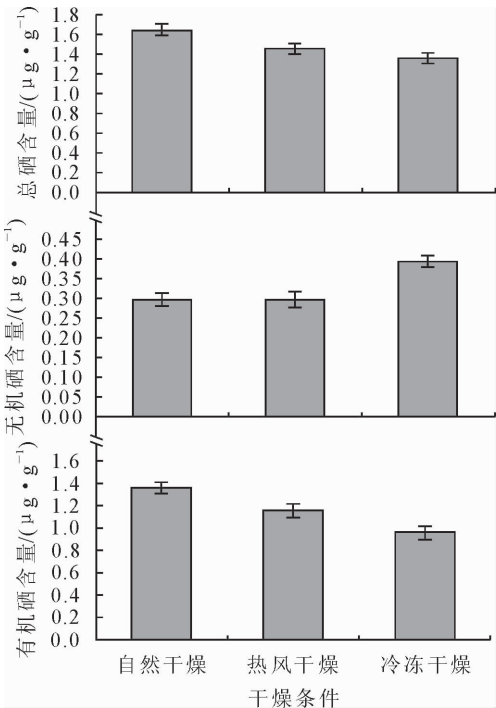


图 6 不同干燥条件下富硒魔芋的硒含量($P<0.05$)

Fig. 6 Contents of selenium in selenium-enriched konjac under different drying conditions

参考文献:

[1] 韩宝瑞,安刚. 魔芋的资源概况与应用研究[J]. 国际老年医学杂志,2010,31(2):87-90.

制备工艺 [J]. 西北林学院学报, 2016, 31(2): 249-254.

ZHANG J, ZHANG Q H, ZHAO L J, *et al.* Optimization of polyurethane/wood powder composite material preparation process [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(2): 249-254. (in Chinese)

[18] FARUK O, SAIN M, FARNOOD R, *et al.* Development of lignin and nanocellulose enhanced bio PU foams for automotive parts [J]. J. Polym. Environ, 2014, 22 (3): 279-288.

[19] 张桂兰, 王正. 木纤维基三元发泡复合材料制备工艺及性能研究 [J]. 西北林学院学报, 2010, 25(4): 186-190.

ZHANG G L, WANG Z. Preparation and properties of foaming ternary bio-fiber composites [J], Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(4): 186-190. (in Chinese)

[20] LI Y, RAGAUSKAS A J. Ethanol organosolv lignin-based rigid polyurethane foam reinforced with cellulose nanowhiskers [J]. RSC Adv. , 2012, 2(8): 3347-3351.

[21] ZHOU X, SAIN M M, OKSMAN K. Semi-rigid biopolyurethane foams based on palm-oil polyol and reinforced with cellulose nanocrystals [J]. Compos. Part A Appl. Sci. Manuf. , 2016, 83: 56-62.

[22] ZHOU X, SETHI J, GENG S, *et al.* Dispersion and reinforcing effect of carrot nanofibers on biopolyurethane foams [J]. Mater. Des. , 2016, 110: 526-531.

[23] ZHOU X, WANG H, ZHANG J, *et al.* Lightweight biobased polyurethane nanocomposite foams reinforced with pineapple leaf nanofibers (PLNFs) [J]. J. Renew. Mater. , 2018, 6 (1): 68-74.

[24] ZHOU X J, LI B, XU Y, *et al.* Tannin-furanic resin foam reinforced with cellulose nanofibers (CNF) [J]. Industrial Crops & Products, 2019, 134: 107-112.

[25] TANPICHAI S, OKSMAN K. Crosslinked poly (vinyl alcohol) composite films with cellulose nanocrystals; mechanical and thermal properties [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2018, 135(3): 45710: 1-11.

[26] LI X, BASSO M C, FIERRO V, *et al.* Chemical modification of tannin/furanis rigid foams by isocyanates and polyurethanes [J]. Maderas Cienc. Y. Tecnol. 2012, 14 (3): 257-265.

[27] LI X, ESSAWY H A, PIZZI A, *et al.* Modification of tannin based rigid foams using oligomers of a hyperbranched poly (amine-ester) [J]. J. Polym. Res. , 2012, 19(12): 21.

[28] 徐洋, 李斌, 周晓剑, 等. 杨梅单宁泡沫的制备工艺研究[J]. 功能材料, 2018, 49(10): 10117-10122, 10126.

[29] LACOSTE C, BASSO M C, PIZZI A, *et al.* Pine tannin-based rigid foams; Mechanical and thermal properties [J]. Industrial Crops & Products, 2013, 43(1): 245-250.

[30] 杨加栋, 张晓灵, 吴文通, 等. 零 ODP 值发泡剂对硬质聚氨酯泡沫的泡孔结构和导热系数的影响[J]. 聚氨酯工业, 2015, 30(1): 9-13.

[31] 刘金虎. 改性酚醛泡沫的制备和性能研究[D]. 长春, 长春工业大学, 2014.

[32] 张化腾, 姚小瑞, 高天元, 等. 三聚氰胺改性脲醛树脂泡沫保温材料性能研究[J]. 森林工程, 2018, 34(6): 32-37, 61.

[33] ZHAO W, PIZZI A, FIERRO V, *et al.* Effect of composition and processing parameters on the characteristics of tannin-based rigid foams. Part I: cell structure [J]. Materials Chemistry & Physics, 2010, 122(1): 175-182.

(上接第 211 页)

[2] LIN K W, HUANG C Y. Physicochemical and textural properties of ultrasound-degraded konjac flour and their influences on the quality of low-fat Chinese-style sausage [J]. Meat Science, 2008, 79(4): 615-622.

[3] 尉芹, 马希汉. 魔芋开发利用研究综述[J]. 西北林学院学报, 1998, 13(3): 62-67.

WEI Q, MA X H. Researches on the Application and Utilization of Amorphophalluskonjac [J]. Journal of Northwest Forestry University, 1998, 13(3): 62-67. (in Chinese)

[4] 刘雨桃, 王子平. 魔芋葡甘聚糖的应用及研究进展[J]. 华西药学杂志, 2008, 23(2): 188-189.

[5] 陈绪放. 安康富硒食品特色农业产业集群发展的 SWOT 分析 [J]. 湖北农业科学, 2012, 51(12): 2620-2623.

[6] 李丽清, 任志秋, 纪伟东. 紫外分光光度法测定小米中微量元素硒的含量[J]. 黑龙江粮食, 2011, 37(6): 48-51.

[7] 邱凌, 仇农学, 薛惠岚. 魔芋干制色泽褐变规律与模型的研究 [J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 1995, 23(6): 38-41.

QIU L, QIU N X, XUE H L. Regularity and model of konjac color-browning under hot air drying [J]. Journal of Northwest A&F University; Natural Science Edition, 1995. 23(6): 38-41. (in Chinese)

[8] 叶维, 李保国. 魔芋热泵干燥特性及数学模型的研究[J]. 食品与发酵科技, 2015, 51(5): 32-36.

[9] IMPAPRASERT R, BOROMPICHAICHARTKUL C, SRZED-NICKIG. A new drying approach to enhance quality of konjacglucmannan extracted from amorphophallusmuelleri [J]. Drying Technology, 2014, 32(7): 851-860.

[10] GEORG W O. Freeze-drying [M]. New York: Wiley-VCH, 1999.

[11] 乔晓玲, 闫祝炜, 张原飞, 等. 食品真空冷冻干燥技术研究进展 [J]. 食品科学, 2008, 29(5): 469-474.

QIAO X L, YAN Z W, ZHANG Y F, *et al.* Research progress on food freeze-drying [J]. Food Science, 2008, 29(5): 469-474. (in Chinese)

[12] 陈伟明. 真空冷冻干燥技术在生物制药方面的应用 [J]. 黑龙江科学, 2014, 5(11): 50-50.

[13] 杨芳, 谢娟平, 王中兴, 等. 富硒魔芋精粉葡甘聚糖和硒含量的测定分析 [J]. 陕西农业科学, 2011, 57(2): 61-63.

[14] 邢文忠, 蒋滔, 王贻宁, 等. 测色仪分析 Solidex 树脂与比色板颜色的匹配性 [J]. 口腔医学研究, 2010, 26(4): 557-559.

[15] 袁忠海. 魔芋葡甘露聚糖的超声提取及高效液相色谱分析 [D]. 西安: 第四军医大学, 2003.

[16] 黄广华, 陈瑞英, 陈居静. 巴里黄檀木材解剖构造、颜色及接触角研究 [J]. 西北林学院学报, 2019, 34(2): 240-245.

HUANG G H, CHEN R Y, CHEN J J. Anatomical structure, color and contact angle of *Dalbergia bariensis* wood [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(2): 240-245. (in Chinese)