

解冻方式对微波干燥甜菜理化性质的影响

Effects of thawing methods on physicochemical properties of microwave-dried beetroots

刘艳^{1,2,3} 唐小闲^{2,3} 高丹^{1,2} 段振华^{1,2} 任爱清^{2,3}

LIU Yan^{1,2,3} TANG Xiaoxian^{2,3} GAO Dan^{1,2} DUAN Zhenhua^{1,2} REN Aiqing^{2,3}

(1. 贺州学院食品与生物工程学院, 广西 贺州 542899; 2. 广西康养食品科学技术重点实验室,

广西 贺州 542899; 3. 贺州学院食品科学与工程技术研究院, 广西 贺州 542899)

(1. School of Food and Bioengineering, Hezhou University, Hezhou, Guangxi 542899, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Health Care Food Science and Technology, Hezhou, Guangxi 542899, China; 3. Research Institute of Food Science and Engineering Technology, Hezhou University, Hezhou, Guangxi 542899, China)

摘要:目的:探索甜菜在冻融预处理中的最佳解冻方式。

方法:经冷冻的甜菜采用不同方式(室温解冻、流水解冻、冷藏解冻、微波解冻和超声波解冻)进行解冻,再进行微波干燥,比较解冻方式对微波干燥甜菜干燥时间、复水比、色泽、甜菜素含量、总酚含量和总黄酮含量的影响。

结果:冷藏解冻用时最长,但解冻损失率最小且微波干燥甜菜的复水比高达4.82;而流水解冻能更好地保持微波干燥甜菜的色泽,解冻方式对微波干燥时间影响不显著。超声波解冻后的甜菜经微波干燥后其甜菜红素含量最高,而微波解冻的甜菜黄素含量最高。与其他解冻方式相比,流水解冻的甜菜经微波干燥后具有较高的总酚含量和总黄酮含量,分别为8.15 mg GAE/g和16.50 mg RE/g。**结论:**流水解冻是甜菜冻融预处理中较适宜的解冻方式,能较好地保持微波干燥甜菜的理化性质。

关键词:甜菜;解冻方式;解冻损失率;复水比;甜菜素

Abstract: Objective: This study aimed to explore the best thawing method for beetroots in freeze-thaw pretreatment. **Methods:** The frozen beetroots were thawed using different thawing methods (room temperature thawing, running water thawing, refrigeration thawing, microwave thawing, and ultrasonic thawing), and then the thawed beetroots were subjected to microwave drying. The effects of different thawing methods on the microwave drying time, rehydration ratio, color,

betalains content, total phenolic content, and total flavonoids content of microwave-dried beetroots were evaluated. **Results:** The results showed that refrigeration thawing required the longest thawing time, but the thawing loss rate was the smallest and the rehydration ratio of microwave-dried beetroots was the largest, which was 4.82. Meanwhile, running water thawing could better maintain the color of microwave-dried beetroots. There was no significant difference in microwave drying time among different thawing methods. It was found that the microwave-dried beetroots prepared by ultrasonic thawing showed the highest betacyanins content, and the microwave-dried beetroots obtained by microwave thawing displayed the highest betaxanthins content. Compared with other thawing methods, running water thawing resulted in higher total phenolic content and total flavonoids content of microwave-dried beetroots, which was 8.15 mg GAE/g and 16.50 mg RE/g, respectively. **Conclusion:** Running water thawing was a more suitable method for the thawing of frozen beetroots, which could provide better physicochemical properties of microwave-dried beetroots. **Keywords:** beetroot; thawing methods; thawing loss rate; rehydration ratio; betalains

甜菜(*Beta vulgaris* L.)又名紫菜头、恭菜、红菜头,具有安全、健康、保健、无毒副作用等特点,被广泛应用于食品、医药等领域^[1]。甜菜中富含大量生物活性化合物,如甜菜素、多酚、黄酮、类胡萝卜素、抗坏血酸、硝酸盐和皂苷等;其含水率较高,贮藏过程易失水和腐烂变质,需进行干燥处理以延长其贮藏期。

冻融是一种非热预处理,即先将原料冻结至冰点,然后在较高温度下解冻冻结的原料^[2]。冻融预处理通过改

基金项目:广西自然科学基金青年科学基金项目(编号:2022GXNSFBA035605);国家自然科学基金地区科学基金项目(编号:32160573)

作者简介:刘艳,女,贺州学院助理研究员,硕士。

通信作者:段振华(1965—),男,贺州学院教授,博士。

E-mail: dzh65@163.com

收稿日期:2023-03-27 **改回日期:**2023-08-02

变细胞膜的渗透性和破坏细胞壁结构可显著提高产品的干燥速率^[3]。郭婷等^[4]研究发现冻融预处理提高了热风干燥大果山楂产品品质。冻融循环2次得到的大果山楂干制品的硬度最小,具有较好的松脆性,干制品亮度值最大且色泽较好。解冻是冻结的逆过程,解冻过程中发生的各种物理、化学变化,会给产品带来一系列的影响^[5]。解冻方式直接影响产品品质,不适宜的解冻方式会破坏产品的理化性质,包括产品汁液流失、变色、风味劣变、质地改变、脂质氧化、蛋白质变性等,导致产品质量降低^[6-8]。常用的解冻方式有水解冻、自然空气解冻、冷藏解冻、超声解冻、微波解冻、超高压解冻、真空解冻、溶液浸渍解冻等^[9-10]。水解冻包括静水解冻和流水解冻,是以水为介质的解冻方法,具有解冻速度快、样品质量损耗少等优点,但易引起产品的营养流失、品质劣变和微生物滋生等问题^[11]。自然空气解冻是以空气为介质进行解冻,又叫室温解冻,是生产加工中常用的解冻方法,具有适用范围广、节约能源、操作简单等优势^[12]。冷藏解冻速率慢,耗时较长,不利于提高生产效率^[13]。微波解冻是利用微波的穿透能力,能够做到快速、深层解冻,不仅能显著缩短解冻时间,降低汁液流失率,还能更好地保持产品质量^[5,14]。但微波功率较大,会导致解冻原料热分布不均匀、边缘熟化、色泽变差、保水性下降等问题^[15]。超声波解冻能提高解冻速率,缩短解冻时间,改善解冻不均匀等问题,但存在能耗大、解冻效果受制于超声波频率和功率等缺点^[15-16]。

Shen等^[17]研究发现,流水解冻可使热风干燥速率明显提高,有效降低了总能耗。此外,冻融预处理还改变了马铃薯面粉的淀粉组成、凝胶化、流变学和热性能。Xu等^[18]研究表明,超声波和不同冻融预处理的应用可显著缩短干燥时间,降低总能耗;采用超声和冷冻—空气解冻预处理的秋葵干物质含量损失最大(9.008%和5.602%),叶绿素降解较低,总酚、总黄酮和果胶含量较高,并具有较强的抗氧化能力,说明冷冻—空气解冻和超声预处理方法的效果优于其他方法。

目前,有关不同解冻方式对甜菜微波干燥品质的影响尚未见报道。研究拟探讨不同解冻方式(包括室温解冻、流水解冻、超声波解冻、微波解冻和冷藏解冻)对微波干燥甜菜理化性质的影响,旨在为冷冻甜菜选择合适的解冻方式,确保冻融预处理甜菜经微波干燥后具有较好的品质提供依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

新鲜甜菜:产地为江苏省徐州市,单果重500g左右,于-4℃冷库中贮藏备用,市售;

芦丁标准品、没食子酸标准品、福林酚试剂:上海源

叶生物科技有限公司;

其他试剂均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

微波炉:G70D20CSP-D(S0)型,广东格兰仕微波炉电器制造有限公司;

微波干燥系统:SAM-255型,美国CEM公司;

电子天平:JJ1000型,常熟市双杰测试仪器厂;

数显恒温水浴锅:HH-4型,常州国华电器有限公司;

水分测定仪:MA 150型,北京赛多利斯仪器系统有限公司;

色差仪:CR400型,日本柯尼卡美能达公司;

冰箱:BCD-215LEKV型,青岛海尔股份有限公司;

可见分光光度计:722型,上海佑科仪器仪表有限公司;

摇摆式高速粉碎机:DFY-600D型,温岭市林大机械有限公司;

数控超声波清洗器:KQ5200DV型,昆山市超声波仪器有限公司。

1.3 冷冻甜菜的制备

新鲜甜菜用自来水洗涤,去皮,切成厚度为3mm、直径为7.5cm的圆片,再用聚乙烯食品包装袋进行包装,每袋300g,密封后于-20℃冷冻12h。

1.4 解冻方法

将冷冻甜菜片从-20℃冰箱取出,随机分为5组进行解冻处理,观察解冻过程中甜菜片冰晶的融化情况,以甜菜片中冰晶全部融化视为解冻终点,并记录解冻时间。

1.4.1 室温解冻 将冷冻甜菜片(300.0g)连同包装袋置于不锈钢托盘中,于室温25℃进行自然室温解冻。

1.4.2 流水解冻 将冷冻甜菜片(300.0g)连同包装袋置于沥水篮,于流速为20mL/s的自来水(水温23℃)中进行解冻。

1.4.3 冷藏解冻 将冷冻甜菜片(300.0g)连同包装袋置于4℃冰箱中进行解冻。

1.4.4 微波解冻 将冷冻甜菜片(300.0g)置于微波专用托盘中,微波功率140W下进行解冻。

1.4.5 超声波解冻 将冷冻甜菜片(300.0g)连同包装袋置于超声波腔体中,用自来水浸没,于超声波功率为200W,超声温度为26℃下进行解冻。

1.5 甜菜微波干燥

将解冻后的甜菜片平铺于样品盘,于微波功率390W下进行微波间歇干燥;微波干燥3min称重一次,间隔3min后再继续进行微波干燥,直至甜菜片质量低于设定值时结束。

1.6 指标测定

1.6.1 最终含水率 采用水分测定仪进行测定。

1.6.2 解冻损失率 称量解冻前样品质量(m_1),解冻结束后取出样品,用吸水纸吸干样品表面水分后再称质量(m_2),并按式(1)计算解冻损失率^[19]。

$$T = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

T ——解冻损失率, %;

m_1 ——解冻前样品的质量, g;

m_2 ——解冻后样品的质量, g。

1.6.3 复水比 取 2.0 g 微波干燥样品,放入盛有 200.0 g 蒸馏水的烧杯中,于 80 °C 水浴锅内进行复水性试验^[20]。复水 15 min 后取出样品置于滤网上,用吸水纸擦干样品表面水分再称重,并按式(2)计算复水比。

$$R_R = \frac{m_r}{m_0}, \quad (2)$$

式中:

R_R ——复水比;

m_0 ——复水前样品的质量, g;

m_r ——复水沥干后样品的质量, g。

1.6.4 色泽 为了保证样品的均匀性,新鲜甜菜打浆后测定其颜色,而微波干燥甜菜样品打粉后测定粉末颜色。按式(3)计算总色差(ΔE)^[21]。

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_0^*)^2 + (a^* - a_0^*)^2 + (b^* - b_0^*)^2}, \quad (3)$$

式中:

ΔE ——色差值;

L^* 、 a^* 、 b^* ——干燥后甜菜的色度值;

L_0^* 、 a_0^* 、 b_0^* ——新鲜甜菜的色度值。

1.6.5 甜菜提取液制备 甜菜经微波干燥后粉碎,过 60 目筛,得到甜菜粉。取 1.0 g 甜菜粉于 50 mL 离心管中,加入 15 mL 体积分数为 50% 的乙醇溶液,旋涡混匀 3 min,5 500 r/min 离心 15 min。收集上清液,分别用 15 mL 体积分数为 50% 的乙醇溶液再提取沉淀物 2 次。合并提取液,并用 50% 乙醇溶液定容至 50 mL,得到甜菜提取液。

1.6.6 甜菜素含量 参照 Stintzing 等^[22]的方法,并按式(4)计算甜菜素含量。

$$C = \frac{(A_{538 \text{ nm}}/A_{480 \text{ nm}} - A_{600 \text{ nm}}) \times D_F \times M_W \times V \times 1\,000}{\epsilon \times l \times m}, \quad (4)$$

式中:

C ——甜菜素含量, mg/g;

$A_{480 \text{ nm}}$ 、 $A_{538 \text{ nm}}$ 、 $A_{600 \text{ nm}}$ ——提取液在 480、538、600 nm 处的吸光值;

D_F ——提取液的稀释倍数;

l ——比色皿光程;

V ——提取液的体积, L;

m ——甜菜粉的质量, g;

M_W ——摩尔质量,甜菜红素、甜菜黄素的摩尔质量分别为 550、308 g/mol;

ϵ ——摩尔消光系数,甜菜红素、甜菜黄素的摩尔消光系数分别为 60 000、48 000 L/(mol · cm)。

1.6.7 总酚含量 参照 Alvarez-Pzrilla 等^[23]的方法。

1.6.8 总黄酮含量 参照 Souza 等^[24]的方法。

1.7 数据处理

采用 SPSS 22.0 统计软件进行方差分析,采用多重比较分析法进行差异显著性分析,小写字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 解冻方式对解冻时间、解冻损失率、干燥时间和最终含水率的影响

2.1.1 解冻时间和解冻损失率 由图 1 可知,不同解冻方式下甜菜的解冻时间差异显著,其中冷藏解冻所需时间最长(为 364.0 min),其次为室温解冻,流水解冻和超声解冻的接近。微波解冻所需时间最短(为 7.3 min),是由于微波发射的高频磁场可使冻结甜菜中水分子发生振荡,分子间剧烈摩擦产热,甜菜从内到外同时吸收微波能量,受热均匀,解冻时间明显缩短^[25]。

解冻损失是食品保水性的一种外在表现形式。冷冻后的甜菜在解冻时,内部冰晶融化的水若不能回到组织中,会变成汁液流出,造成较多的重量损失,同时也会影响甜菜品质。由图 1 可知,5 种解冻方式均会产生一定的解冻损失,其中超声波解冻的最高达 9.91%,与王夷秀等^[10]的结果一致。这可能是由于超声振动产生的能量被甜菜吸收,能量传递过程中导致甜菜内外温度不均匀及超声波的“空化效应”,引起甜菜汁液流失,导致解冻损失率大。冷藏解冻和流水解冻的甜菜解冻损失率显著低于

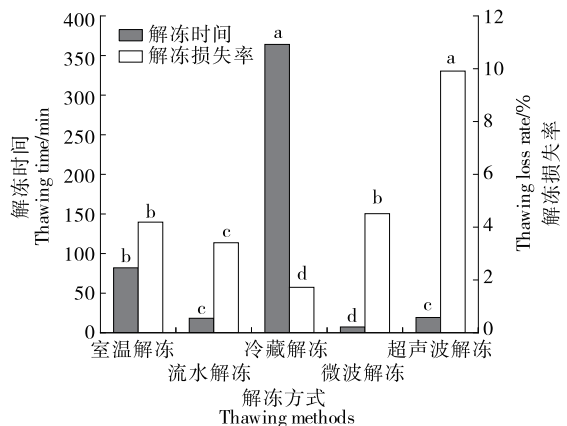


图 1 解冻方式对解冻时间和解冻损失率的影响
Figure 1 Effects of thawing methods on thawing time and thawing loss rate

室温解冻、微波解冻及超声波解冻的 ($P < 0.05$)。冯钰敏等^[26]研究表明,冻藏解冻和流水解冻的解冻损失率最小,显著低于室温解冻和微波解冻的。冷藏解冻的解冻损失率最低为 1.72%,与王晋等^[27]的研究结果一致,其原因可能是解冻温度较低,解冻时间较长,解冻时冰晶融化形成的渗出液有足够的时间又进入细胞内^[28],说明冷藏解冻条件下甜菜的保水性最强,能最大程度降低解冻导致的物质流失^[29]。Xia 等^[30]研究表明,微波解冻的解冻损失率高于冷藏解冻的,且冷藏解冻的解冻损失率最低,与试验结果一致。

2.1.2 微波干燥时间和最终含水率 由图 2 可知,不同解冻方式下甜菜微波干燥时间为 37.0~39.7 min,且不同解冻方式对微波干燥时间影响不显著,可能是因为微波干燥过程中甜菜的量较少且微波干燥速率快,干燥时间较短,所有微波干燥时间差异不明显。同时,经微波干燥后甜菜的最终含水率为 4.34%~4.76%,不同解冻方式对微波干燥甜菜的最终含水率无显著影响,这也说明最终含水率对微波干燥甜菜品质的影响可以忽略不计。

2.2 解冻方式对微波干燥甜菜复水性和色泽的影响

2.2.1 复水比 由图 3 可知,不同解冻方式对微波干燥甜菜的复水比影响显著 ($P < 0.05$)。经冷藏解冻的甜菜微波干燥后其复水比最高达 4.82,可能与解冻速率及解冻时间有关,冷藏解冻时间长,冰晶融化较慢,对细胞破坏程度较少,解冻损失较少,故复水性较好。微波解冻的甜菜经微波干燥后复水比相对高于流水解冻、超声波解冻和室温解冻的,室温解冻的甜菜经微波干燥后复水比最小,可能与室温解冻解冻损失率较大且解冻时间长有关,导致细胞破坏程度较高,故复水比较少。而流水解冻和超声波解冻对微波干燥甜菜复水比的影响差异不显著。

2.2.2 色泽 由表 1 可知,不同解冻方式得到的甜菜经微波干燥后色泽品质指标均有显著差异 ($P < 0.05$)。与

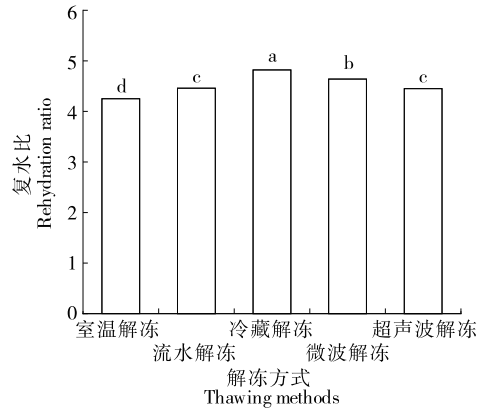


图 3 解冻方式对微波干燥甜菜复水比的影响

Figure 3 Effects of thawing methods on rehydration ratio of microwave-dried beetroots

表 1 解冻方式对微波干燥甜菜色泽的影响

Table 1 Influence of thawing methods on the color characteristics of microwave-dried beetroots

解冻方式	L^*	a^*	b^*	ΔE
室温解冻	42.30±0.17 ^b	20.89±0.20 ^a	5.23±0.11 ^a	32.99±2.35 ^a
流水解冻	39.51±0.36 ^d	17.90±0.64 ^d	2.80±0.23 ^d	5.81±1.45 ^d
冷藏解冻	41.69±0.27 ^c	19.72±0.93 ^{bc}	3.23±0.08 ^{bc}	16.61±1.18 ^{bc}
微波解冻	43.03±0.19 ^a	19.87±0.15 ^b	3.41±0.16 ^b	19.25±1.19 ^b
超声波解冻	41.25±0.50 ^c	19.60±0.19 ^c	2.51±0.10 ^c	14.90±1.00 ^c
新鲜甜菜	35.90±0.47 ^e	16.52±0.68 ^e	2.47±0.19 ^e	—

新鲜甜菜相比,经微波干燥甜菜的 L^* 值显著增大,表明甜菜微波干燥后亮度增大。微波解冻后得到的微波干燥甜菜 L^* 值最高,显著高于室温解冻、冷藏解冻、超声波解冻和流水解冻的,流水解冻导致甜菜的 L^* 值最低,说明流水解冻降低了甜菜的亮度。 a^* 值表示甜菜的红色度, a^* 值越高说明甜菜越红,这与甜菜中的色素含量有关。微波干燥后的甜菜 a^* 值显著高于新鲜甜菜,可能是由于微波干燥后,甜菜水分含量减少,色素含量相对增大,故 a^* 值显著增加。室温解冻的甜菜经微波干燥后 a^* 值最大,说明甜菜的颜色较红,而流水解冻导致微波干燥甜菜的 a^* 值相对最小,与新鲜甜菜的接近。而冷藏解冻、微波解冻和超声波解冻对微波干燥甜菜 a^* 值的影响不显著。所有微波干燥甜菜的 b^* 值均高于新鲜甜菜,说明甜菜在干燥过程中发生了一些褐变^[18]。室温解冻下得到的微波干燥甜菜的 b^* 值显著高于其他解冻方式的 ($P < 0.05$),而超声波解冻得到的微波干燥甜菜的 b^* 值显著低于其他解冻方式的,与新鲜甜菜的 b^* 值接近且差异不显著。室温解冻后的微波干燥甜菜 ΔE 最大,表明其与新鲜甜菜的颜色差异最大,而流水解冻后得到的微波干燥甜菜 ΔE 最小,仅为 5.81,与 Xu 等^[18] 的研究结果相反。

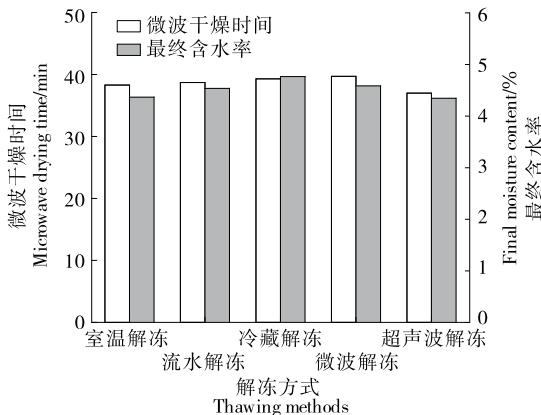


图 2 解冻方式对微波干燥时间和最终含水率的影响

Figure 2 Effects of thawing methods on microwave drying time and final moisture content

这可能是由于流水解冻的时间相对较短且解冻损失率不高,所以微波干燥后甜菜的颜色变化不大,与新鲜甜菜的颜色最为接近。

2.3 解冻方式对微波干燥甜菜的甜菜素、总酚和总黄酮含量的影响

2.3.1 甜菜素含量 由图 4 可知,超声波解冻的甜菜经微波干燥后甜菜红素含量最高,且显著高于其他几种解冻方式的,可能是由于超声波的“空化效应”更有利于甜菜红素的提取。微波解冻和室温解冻导致微波干燥甜菜的甜菜红素含量显著低于超声波解冻、流水解冻和冷藏解冻的,可能是由于微波的热效应,剧烈快速解冻导致甜菜红素损失,而室温解冻所需解冻时间稍长,解冻损失率也相对较高,甜菜红素随汁液流出。然而,微波解冻的甜菜经微波干燥后甜菜黄素含量显著高于其他解冻方式,可能是微波解冻过程中温度升高,甜菜红素转变成甜菜黄素。此外,超声波解冻、流水解冻、室温解冻和冷藏解冻的甜菜黄素含量无显著差异($P>0.05$),说明这几种解冻方式对甜菜黄素含量的影响不大。

2.3.2 总酚含量和总黄酮含量 由图 5 可知,解冻方式显著影响微波干燥甜菜的总酚含量($P<0.05$)。流水解冻得到的甜菜经微波干燥后总酚含量最高,其次为冷藏解冻、室温解冻、超声波解冻和微波解冻的,与 Xu 等^[18]的研究结果类似。微波解冻导致甜菜总酚含量最低,显著低于其他 4 种解冻方式,可能是由于微波解冻的解冻损失率较高,同时微波解冻的热效应导致总酚有所损失。

解冻方式对微波干燥甜菜总黄酮含量的影响显著($P<0.05$),不同解冻方式得到的微波干燥甜菜总黄酮含量排序为超声波解冻>流水解冻>冷藏解冻>室温解冻>微波解冻。超声波解冻(16.59 mg RE/g)和流水解冻(16.50 mg RE/g)的甜菜经微波干燥后总黄酮含量显著高于其他 3 种解冻方式的,可能是超声波的“空化效

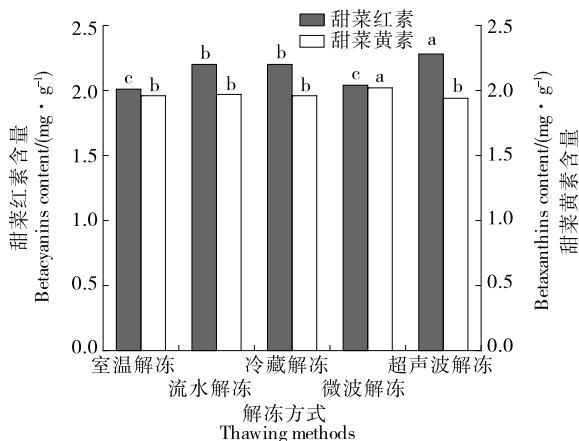


图 4 解冻方式对微波干燥甜菜甜菜素含量的影响
Figure 4 Effects of thawing methods betalains content on of microwave-dried beetroots

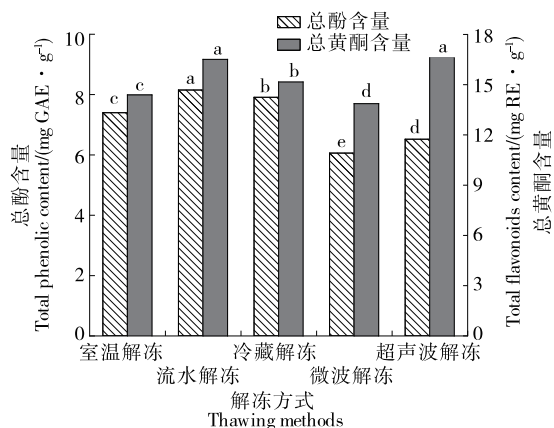


图 5 解冻方式对微波干燥甜菜总酚含量和总黄酮含量的影响

Figure 5 Effects of thawing methods on total phenolic content and total flavonoid content of microwave-dried beetroots

应”更有利于总黄酮的提取;流水解冻的解冻损失率较小,总黄酮损失也相对较小,故经微波干燥后甜菜的总黄酮含量相对较高。而微波解冻后的甜菜经微波干燥后总黄酮含量最低为 13.86 mg RE/g,可能是微波的热效应导致损失了一部分总黄酮。

3 结论

考察了不同解冻方式对微波干燥甜菜理化性质的影响。结果表明,不同解冻方式的解冻时间差异显著,冷藏解冻的时间最长,微波解冻的时间最短,但微波干燥时间和甜菜最终含水率无显著差异;不同解冻方式对解冻损失率影响显著($P<0.05$),超声波解冻的甜菜解冻损失率最大,而冷藏解冻的最小。与其他解冻方式相比,冷藏解冻的微波干燥甜菜的复水比最大,流水解冻可以更好地保存甜菜的颜色。通过超声波解冻获得的微波干燥甜菜的甜菜红素含量显著高于其他解冻方式的,而微波解冻获得的微波干燥甜菜的甜菜黄素含量最高。不同解冻方式对微波干燥甜菜的总酚含量和总黄酮含量影响显著($P<0.05$),流水解冻的甜菜经微波干燥后显示出最高的总酚含量,而微波解冻导致微波干燥甜菜的总酚含量显著低于其他解冻方式的。同时,流水解冻和超声波解冻后的微波干燥甜菜中总黄酮含量显著高于其他解冻方式的。综合考虑微波干燥甜菜的理化性质,流水解冻是一种更适合于冷冻甜菜解冻的方式。试验仅探究冻融预处理中解冻方式对微波干燥甜菜理化性质的影响,而未考虑冻结条件,尤其冷冻温度的影响,故后续研究重点为冷冻温度对微波干燥甜菜理化性质的影响。

参考文献

- [1] 刘亚昕, 闫桦, 唐玲, 等. 红甜菜和甜菜红素的综合应用研究进展[J]. 中国农学通报, 2022, 38(13): 157-164.
LIU Y X, YAN H, TANG L, et al. Red beet and betacyanins: Research progress on comprehensive application [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(13): 157-164.
- [2] WU X F, ZHANG M, ADHIKARI B, et al. Recent developments in novel freezing and thawing technologies applied to foods[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 57(17): 3 620-3 631.
- [3] ANDO Y, MAEDA Y, MIZUTANI K, et al. Impact of blanching and freeze-thaw pretreatment on drying rate of carrot roots in relation to changes in cell membrane function and cell wall structure[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 71: 40-46.
- [4] 郭婷, 邓宏挺, 陈益能, 等. 冻融预处理对大果山楂热风干燥产品品质影响[J]. 食品工业, 2019, 40(11): 53-57.
GUO T, DENG H T, CHEN Y N, et al. Effect of freeze-thaw pretreatment on the product quality of hot air drying for hawthorn [J]. Food Industry, 2019, 40(11): 53-57.
- [5] 陈宏运, 伍志权, 何鑫平, 等. 不同解冻方法对液浸速冻荔枝品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(5): 77-81.
CHEN H Y, WU Z Q, HE X P, et al. Effects of different thawing methods on quality characteristics of immersion-frozen litchi [J]. Food Research and Development, 2021, 42(19): 66-71.
- [6] LI B, SUN D W. Novel methods for rapid freezing and thawing of foods: A review [J]. Journal of Food Engineering, 2002, 54(3): 175-182.
- [7] 张昕. 不同解冻工艺对鸡胸肉品质的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2017: 7-8.
ZHANG X. Effects of different thawing methods on the quality of chicken breast[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017: 7-8.
- [8] HERGENREDER J E, HOSCH J J, VARNOLD K A, et al. The effects of freezing and thawing rates on tenderness, sensory quality, and retail display of beef subprimals[J]. Journal of Animal Science, 2013, 91(1): 483-490.
- [9] 郑静静, 林琳, 张艳凌, 等. 不同解冻方式对熟制小龙虾理化特性的比较分析[J]. 现代食品科技, 2020, 36(9): 188-194.
ZHENG J J, LIN L, ZHANG Y L, et al. Comparison analysis of physicochemical properties of cooked crayfish by different thawing methods[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(9): 188-194.
- [10] 王夷秀, 陈芹芹, 毕金峰, 等. 不同解冻方法对速冻桑葚汁液流失率, 理化品质及抗氧化活性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(7): 149-154.
WANG Y X, CHEN Q Q, BI J F, et al. Effects of different thawing methods on drip loss, physicochemical quality and antioxidant activity of quick-frozen mulberry fruits[J]. Food Science, 2017, 38(7): 149-154.
- [11] 马长伟, 曾名勇. 食品工艺学导论[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2002: 89-92.
MA C W, ZENG M Y. Introduction to food technology [M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2002: 89-92.
- [12] 李璐倩, 严琪格, 哈玉洁, 等. 不同解冻方法对牦牛肉品质特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(23): 123-130.
LI L Q, YAN Q G, HA Y J, et al. Effects of different thawing methods on the quality characteristics of yak meat[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(23): 123-130.
- [13] 刘磊, 夏强, 曹锦轩, 等. 不同解冻方法对鹅腿肉理化特性和品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(15): 256-261.
LIU L, XIA Q, CAO J X, et al. Influence of different thawing methods on physicochemical properties and quality of goose thigh meat[J]. Food Science, 2020, 41(15): 256-261.
- [14] 牛红霞, 李兴国, ALHUSSIEN S A F, 等. 不同解冻方式对沙棘果实品质的影响[J]. 食品工业, 2015, 36(5): 42-46.
NIU H X, LI X G, ALHUSSIEN S A F, et al. Effects of different thawing methods on sea buckthorn fruit quality[J]. Food Industry, 2015, 36(5): 42-46.
- [15] 彭泽宇, 朱明明, 孙红东, 等. 肉品新型解冻技术及其对蛋白特性影响的研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(19): 303-310.
PENG Z Y, ZHU M M, SUN H D, et al. Recent advances in new meat thawing technologies and their effects on protein properties [J]. Food Science, 2020, 41(19): 303-310.
- [16] SHI Z, ZHONG S, YAN W, et al. The effects of ultrasonic treatment on the freezing rate, physicochemical quality, and microstructure of the back muscle of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 111: 301-308.
- [17] SHEN G, ZHANG L, HU T, et al. Preparation of potato flour by freeze-thaw pretreatment: Effect of different thawing methods on hot-air drying process and physicochemical properties[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 133: 110157.
- [18] XU X, ZHANG L, FENG Y B, et al. Ultrasound freeze-thawing style pretreatment to improve the efficiency of the vacuum freeze-drying of okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench) and the quality characteristics of the dried product [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 70: 105300.
- [19] 阿依木古丽, 蔡勇, 陈士恩, 等. 反复冷冻-解冻对牛肉品质及组织结构的影响[J]. 食品科学, 2011, 32(7): 109-112.
AYIMUGULI, CAI Y, CHEN S E, et al. Effect of repeated freezing-thawing on quality properties and structure of beef[J]. Food Science, 2011, 32(7): 109-112.
- [20] XU Y, XIAO Y, LAGNIKA C, et al. A comparative study of drying methods on physical characteristics, nutritional properties and antioxidant capacity of broccoli[J]. Drying Technology, 2019, 38(10): 1 378-1 388.
- [21] LIU Y Y, WANG Y, LU W Q, et al. Freeze-thaw and ultrasound pretreatment before microwave combined drying affects drying kinetics, cell structure and quality parameters of *Platycodon grandiflorum*[J]. Industrial Crops and Products, 2021, 164: 113391.

[22] STINTZING F C, HERBACH K M, MOSSHAMMER M R, et al. Color, betalain pattern, and antioxidant properties of cactus pear (*Opuntia* spp.) clones [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2015, 53(2): 442-451.

[23] ALVAREZ-PZRRILLA E, DE LA ROSA L A, AMAROWICZ R, et al. Antioxidant activity of fresh and processed Jalapeno and Serrano peppers[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(1): 163-173.

[24] SOUZA V R D, PEREIRA P A P, SILVA T L T D, et al. Determination of the bioactive compounds, antioxidant activity and chemical composition of Brazilian blackberry, red raspberry, strawberry, blueberry and sweet cherry fruits[J]. *Food Chemistry*, 2014, 156: 362-368.

[25] 李锦锦, 莫然, 唐善虎, 等. 不同解冻方式对猪肝理化特性及氧化稳定性的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(14): 302-309.
LI J J, MO R, TANG S H, et al. Effects of different thawing methods on physicochemical properties and oxidation stability of porcine liver[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(14): 302-309.

[26] 冯钰敏, 梁诗惠, 邓华荣, 等. 不同解冻方式对鸭腿肉品质特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(3): 336-345.
FENG Y M, LIANG S H, DENG H R, et al. Effects of different thawing methods on the quality characteristics of the duck leg meat[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(3): 336-345.

[27] 王晋, 高学慧, 陈云云, 等. 解冻方式对船载超低温鲑鱼肌肉保水性及品质的影响[J]. *食品与机械*, 2022, 38(9): 159-164, 197.
WANG J, GAO X H, CHEN Y Y, et al. Effect of thawing methods on water retention and quality of ship-borne ultra-low-temperature squid muscle[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(9): 159-164, 197.

[28] 靳青青, 马兆立, 李温静, 等. 解冻方法及解冻时间对冻结猪肉品质的影响[J]. *肉类工业*, 2013(11): 7-11.
JIN Q Q, MA Z L, LI W J, et al. Effects of defrosting methods and time on quality of frozen pork[J]. *Meat Industry*, 2013(11): 7-11.

[29] 张艳妮, 刘婷, 张雯雯, 等. 不同解冻方式对鸡胸肉物理品质的影响[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(22): 57-63.
ZHANG Y N, LIU T, ZHANG W W, et al. Effects of different thawing methods on the physical quality of chicken breast[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(22): 57-63.

[30] XIA X F, KONG B H, LIU J, et al. Influence of different thawing methods on physicochemical changes and protein oxidation of porcine longissimus muscle [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2012, 46(1): 280-286.

(上接第 130 页)

[19] 张连文, 杨传民, 孟宪文. 水晶梨运输包装件振动冲击性能实验研究[J]. *包装工程*, 2010, 31(11): 34-38, 45.
ZHANG L W, YANG C M, MENG X W. Experimental study on the vibration and impact performance of crystal pear transport packaging parts [J]. *Packaging Engineering*, 2010, 31(11): 34-38, 45.

[20] 王璐璐, 刘美华, 张连文, 等. 果品物流运输包装件堆码振动传递性能的试验研究[J]. *包装工程*, 2012, 33(19): 5-10.
WANG L L, LIU M H, ZHANG L W, et al. Experimental study on the vibration transmission performance of fruit logistics and transport packaging parts stacking [J]. *Packaging Engineering*, 2012, 33(19): 5-10.

[21] 康维民, 肖念新, 蔡金星, 等. 模拟 3 自由度振动条件下水果运输振动加速度传递率及损伤研究[J]. *农业工程学报*, 2003(6): 219-222.
KANG W M, XIAO N X, CAI J S, et al. Study on acceleration transfer rate and damage of fruit transport vibration under simulated 3-degree-of-freedom vibration conditions[J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2003(6): 219-222.

[22] 张连文, 杨传民, 孟宪文, 等. 圣女果运输包装件振动冲击性能试验研究[J]. *振动工程学报*, 2011, 24(1): 73-77.
ZHANG L W, YANG C M, MENG X W, et al. Experimental study on the vibration and impact performance of the transport packaging of sainfoin[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2011, 24(1): 73-77.

[23] 朱元国, 范金华, 张军, 等. 高等工程数学[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 288-296.
ZHU Y G, FAN J H, ZHANG J, et al. *Mathematics of higher engineering*[M]. Beijing: Science Press, 2019: 288-296.

(上接第 165 页)

[21] LUCIELEN O D S, TATIANE A G, BEATRIZ T, et al. Glutathione production using magnetic fields generated by magnets [J]. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 2012, 55(6): 921-926.

[22] LARAMEE C B, FRISCH P, MCLEOD K, et al. Elevation of heat shock gene expression from static magnetic field exposure in vitro [J]. *Bioelectromagnetics*, 2014, 35(6): 406-413.

[23] 韩馨仪, 赵松松, 刘斌, 等. 交变磁场抑制葡萄冻害机理分析及试验研究[J]. *河北农业大学学报*, 2021, 44(2): 97-103.
HAN X Y, ZHAO S S, LIU B, et al. Analysis and experimental study on the inhibition mechanism of grape freezing injury by alternating magnetic field [J]. *Journal of Hebei Agricultural University*, 2021, 44(2): 97-103.

[24] WELLER A, NOLTING F, STAERK H. A quantitative interpretation of the magnetic field effect on hyperfine-coupling-induced triplet formation from radical ion pairs [J]. *Chemical Physics Letters*, 1983, 96(1): 24-27.