

超声和烫漂预处理对红薯叶热风干燥的影响

Effect of ultrasonic and blanching pretreatment on hot air drying of sweet potato leaves

张迎敏¹ 任广跃^{1,2} 屈展平¹

ZHANG Ying-min¹ REN Guang-yue^{1,2} QU Zhan-ping¹

靳力为¹ 段续^{1,2} 张乐道^{1,2}

JIN Li-wei¹ DUAN Xu^{1,2} ZHANG Le-dao^{1,2}

(1. 河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471000;

2. 粮食储藏安全河南省协同创新中心, 河南 郑州 450001)

(1. College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471000, China; 2. Collaborative Innovation Center of Grain Storage Security, Henan Province, Zhengzhou, Henan 450001, China)

摘要:采用超声、烫漂两种方式对红薯叶进行热风干燥前的预处理,研究超声时间、超声功率、超声温度和烫漂时间、烫漂液 ZnAc₂ 与 EDTA-2Na 质量比、烫漂温度对红薯叶热风干燥后叶绿素、复水性、色差、干燥特性、能耗以及微观结构的影响。结果表明:超声处理的最佳工艺为超声时间 10 min、超声功率 300 W、超声温度 40 ℃,经超声预处理的红薯叶干燥效率较高,皱缩率低,组织结构较为完整;烫漂处理的最佳工艺为烫漂时间 60 s、烫漂液 ZnAc₂ 与 EDTA-2Na 质量比 2:1、烫漂温度 80 ℃,经护色液烫漂处理干燥后的红薯叶复水率、叶绿素含量和色泽都稍高,质构紧密均匀,细胞开孔率高,总能耗低。

关键词:热风干燥;红薯叶;超声;烫漂;干燥品质

Abstract: In order to optimize the hot air drying process of fresh sweet potato leaves and improve its drying quality, the pretreatment of sweet potato leaves before hot air drying was carried out by ultrasonic and blanching, and different ultrasonic power, temperature, time and proportion of blanching liquid, temperature. The effect of time on chlorophyll, rehydration, chromatic aberration, drying characteristics, energy consumption and microstructure of sweet potato leaves after hot air. The experimental results showed that the optimal ultrasonic conditions are: time 10 min,

power 300 W, temperature 40 ℃, the ultrasonic pretreatment of sweet potato leaves has a higher drying efficiency, lower shrinkage rate, and more complete tissue structure. The optimum process conditions were as follow: time 60 s, ratio 2:1, temperature 80 ℃, the sweet potato leaf rehydration rate, chlorophyll content and color were slightly higher after the blanching treatment, and the texture was tight and uniform, with a high cell opening rate, and a low total energy consumption.

Keywords: hot air drying; sweet potato leaves; ultrasonic blanching; drying quality

红薯叶为红薯藤蔓叶子,一年可多次收获,产量与红薯块茎相似。红薯叶富含大量营养和功能成分,如蛋白质、膳食纤维、多酚类、黄酮类及矿物质等,可作为优质蔬菜资源食用^[1-2]。现有的红薯叶产品包括红薯叶保健茶^[3]、红薯叶益生菌健康饮品^[4]、红薯叶发酵饮料^[5]、红薯叶山楂玫瑰保健清酒^[6]及红薯叶戚风蛋糕^[7]等。由于储存和运输条件有限,上述产品的加工容易造成原料损失和营养物质的恶化^[8]。同时红薯叶利用率较低,大部分都被遗弃在农田,造成严重的环境污染和资源浪费^[9]。红薯叶如若干燥或研磨成粉末不仅可以减少储存和运输的消损,还可更易添加到主食、休闲食品、饮料及干制辅料等食品中,以弥补食品中营养素的不足,提高红薯叶的加工利用率。

热风干燥是一种操作简单、生产成本低廉的干燥技术,是目前果蔬干制品中运用最普遍且经济性较高的加工形式,干燥速率高、所用时间短,但对品质有不利影响^[10]。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(编号:31671907);河南省高等学校重点科研项目资助计划立项项目(编号:20A550006)

作者简介:张迎敏,女,河南科技大学在读硕士研究生。

通信作者:任广跃(1971—),男,河南科技大学教授,博士。

E-mail:guangyueyao@163.com

收稿日期:2019-09-13

干燥前的预处理对改善物料色泽、减少营养成分流失、缩短干燥时间等有着积极影响^[11]。司金金等^[12]研究得到红薯叶的最佳烫漂处理条件为 90 °C、50 s。马瑞等^[13]发现,随着漂烫温度升高,预处理时间变短,黄花菜干制品中抗坏血酸、叶绿素含量提高,褐变度及 5-羟甲基糠醛含量降低,产品色泽较好。

超声作为一种现代化食品加工技术,能够较好地保持食品组分的色、香、味及营养物质含量,改变物料组织结构,提高生产效率,减少能源消耗和污染^[14-15]。为了提高干燥效率,热风干燥通常在较高温度下进行,增加了干燥过程中的能耗,同时高温不利于食品中热敏性成分和某些活性成分的保存。将超声用于热风干燥可降低热风干燥温度,减少耗能,提高热风干燥效率^[16]。

试验拟研究超声辅助超声时间、超声温度、超声功率和烫漂时间、烫漂液 ZnAc₂ 与 EDTA-2Na 质量比、烫漂温度对红薯叶热风干燥过程中干基含水率、色泽、叶绿素含量和复水性的影响,以期对红薯叶精深加工和高价值利用提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

红薯叶:台湾红薯叶,陆马绿色蔬菜农产品基地;

乙醇、乙二胺四乙酸二钠(EDTA-2Na):分析纯,天津市德恩化学试剂有限公司;

乙酸锌(ZnAc₂):分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;

石英砂:分析纯,天津石英钟厂霸州市化工分厂;

碳酸钙粉:分析纯,天津市大茂化学试剂厂。

1.1.2 仪器与设备

电子分析天平:JA2003-N 型,上海佑科仪器仪表有限公司;

电热鼓风干燥箱:101 型,北京市永光明医疗器械厂;

电热恒温水浴:HH-S4 型,北京科伟永兴仪器有限公司;

紫外—可见分光光度计:UV-2600 型,上海龙尼柯仪器有限公司;

色差仪:D-110 型,美国爱色丽公司;

台式电镜:TM3030 型,日本电子株式会社;

数控超声波清洗器:KQ-500DE 型,昆山市超声仪器有限公司;

冰箱:BC 型,青岛海尔股份有限公司。

1.2 方 法

1.2.1 红薯叶烫漂预处理工艺

挑选→清洗→沥干→烫漂→冷却、沥水→干燥

(1) 烫漂时间:固定烫漂温度 90 °C、ZnAc₂ 与 EDTA-2Na 质量比 1:1,烫漂时间分别为 30,60,90,120,150 s,

探究烫漂时间对红薯叶色泽、叶绿素和复水性的影响。

(2) ZnAc₂ 与 EDTA-2Na 质量比:最佳烫漂时间,烫漂温度 90 °C,ZnAc₂ 与 EDTA-2Na 质量比分别为 1:1,1:2,1:3,2:1,3:1(护色剂总量 3 g/kg 水),探究 ZnAc₂ 与 EDTA-2Na 质量比对红薯叶色泽、叶绿素和复水性的影响。

(3) 烫漂温度:最佳 ZnAc₂ 与 EDTA-2Na 质量比和烫漂时间下,烫漂温度分别为 80,85,90,95,100 °C,探究烫漂温度对红薯叶色泽、叶绿素和复水性的影响。

1.2.2 红薯叶超声预处理工艺

挑选→清洗→沥干→超声→冷却、沥水→干燥

(1) 超声时间:超声温度 60 °C、超声功率 200 W,超声时间分别为 5,10,15,20,25,30 min,探究超声时间对红薯叶色泽、叶绿素和复水性的影响。

(2) 超声功率:超声温度 60 °C、最佳超声时间,超声功率分别为 200,250,300,350,400 W,探究超声功率对红薯叶色泽、叶绿素和复水性的影响。

(3) 超声温度:最佳超声时间和超声功率下,超声温度分别为 40,50,60,70,80 °C,探究超声温度对红薯叶色泽、叶绿素和复水性的影响。

1.2.3 色泽的测定 参照文献^[18]的方法,分别按式(1)和(2)计算色度变化值和饱和度。

$$\Delta E = \sqrt{(L - L_0)^2 + (a - a_0)^2 + (b - b_0)^2}, \quad (1)$$

$$C = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad (2)$$

式中:

L ——明暗指数;

a ——红绿值;

b ——黄蓝值;

ΔE ——色差值;

C ——色调饱和度;

L_0, a_0, b_0, C_0 ——新鲜红薯叶色度值, $L_0 = 48.81$, $a_0 = -6.00$, $b_0 = 17.69$, $C_0 = 18.91$ 。

1.2.4 叶绿素含量的测定 根据文献^[17]修改如下:准确称取 0.20 g 干制红薯叶,向研钵中加入 95%乙醇溶液 3 mL 和少许石英砂、碳酸钙粉(用于中和酸性,防止叶绿素酯酶分解叶绿素)并研磨成匀浆,再加入 95%乙醇溶液 2 mL 继续研磨至组织细腻变白,滤纸过滤至 25 mL 容量瓶,用滴管吸取 95%乙醇溶液将钵体洗净,清洗过滤至容量瓶中,并用 95%乙醇溶液沿滤纸周围洗脱色素至滤纸及组织残渣全部变白,用 95%乙醇溶液定容至 25 mL,于 645,663 nm 处测定溶液吸光值,按式(3)和(4)计算叶绿素含量。

$$N = 20.21 \times A_{645} + 8.02 \times A_{663}, \quad (3)$$

$$D = \frac{N \times V}{m \times 1000}, \quad (4)$$

式中:

A_{663} ——663 nm 下红薯叶提取液吸光度;
 A_{645} ——645 nm 下红薯叶提取液吸光度;
 N ——25 mL 溶液中叶绿素浓度,mg/L;
 D ——叶绿素含量,mg/g;
 V ——提取液体积,mL;
 m ——红薯叶质量,g。

1.2.5 复水率的测定 取干燥后的红薯叶,加入 300 mL 清水,室温下浸泡 2 h,滤纸沥干表面水分,称重,每个样品重复 3 次,按式(5)计算复水率^[18]。

$$R = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\%, \quad (5)$$

式中:

R ——干燥红薯叶复水率,%;

m_1 ——红薯叶样品质量,g;

m_2 ——样品复水后的沥干质量,g。

1.2.6 干基含水率测定 按 GB/T 5009.2—2016 执行,以干基湿含量表示含水率^[19],并按式(6)进行计算。

$$M_d = \frac{m_w}{m_d}, \quad (6)$$

式中:

M_d ——干基含水率,g/g;

m_w ——物料中水分含量,g;

m_d ——物料中干物质质量,g。

1.2.7 微观结构测定 红薯叶经热风干燥后,取约 0.2 cm 大小正方形干制品进行微观结构测定^[20]。

1.2.8 能耗测定 分为干燥前预处理和干燥过程能耗两部分,只考虑机器自身的实际输出功率能耗,忽略预处理过程和干燥系统中其他设备以及物料自身的热损失,按式(7)计算系统能耗^[20]。

$$E = \int_0^{t_1} P_1 dt_1 + \int_0^{t_2} P_2 dt_2, \quad (7)$$

式中:

t_1 ——预处理所需时间,s;

t_2 ——干燥所需时间,s;

P_1 ——预处理输入功率,W;

P_2 ——热风干燥箱输入功率,W;

E ——总能耗,J。

1.2.9 数据处理 采用 Origin 8.5 软件进行统计分析和作图。

2 结果与分析

2.1 烫漂工艺对红薯叶热风干燥的影响

2.1.1 烫漂时间 由图 1 可知,干基含水率随干燥时间的增长逐渐减小,在相同干燥时间内,随烫漂时间的增长,干基含水率先减小后增大再减小,前期烫漂时间增长有利于红薯叶内部组织结构变得疏松稚嫩,结合水相对减少,因此所需干燥时间变短^[21],烫漂时间过长会破坏细胞孔隙,不利于水分散失,造成干燥速率减小。叶绿素含量随烫漂时间的增长先增大后减小,当烫漂时间为 60 s 时,叶绿素含量最高(6.96 mg/g);当烫漂时间为 150 s 时,叶绿素含量最低(5.04 mg/g),烫漂时间太长一部分叶绿素溶于预处理液中,另一部分叶绿素结构被破坏,因此红薯叶叶绿素含量开始下降。复水率随烫漂时间的增长先减小后增大,当烫漂时间为 30,120 s 时,复水率最高,为 184%,当烫漂时间为 90 s 时,复水率最低,为 164%。

由表 1 可知, L 值随烫漂预处理时间的增长先增大后减小,当烫漂时间为 60 s 时,达到最大值,此时, C 值较大(所有产品中颜色最亮的), ΔE 最小(与新鲜红薯叶相比色差值最小),说明适当的预处理可有效减少干燥过程中褐变的发生。烫漂时间为 60 s 时,干燥后红薯叶的叶绿素含量最高,叶子表面褐变率最低,颜色最鲜亮,复水比和干燥速率都相对较高,因此选择 60 s 为最佳烫漂时间。

2.1.2 $ZnAc_2$ 与 EDTA-2Na 质量比 由图 2 可知,在同一干燥时间下,干基含水率随 $ZnAc_2$ 与 EDTA-2Na 质量比的增加先减小后增大,当 $ZnAc_2$ 与 EDTA-2Na 质量比为 2:1 时,干基含水率最小,干燥速率最快;烫漂液中添加 $ZnAc_2$ 有利于红薯叶表面水分迁移,但添加量过高会锁住水分,阻碍水分移动,使得干燥过程中水分不易蒸

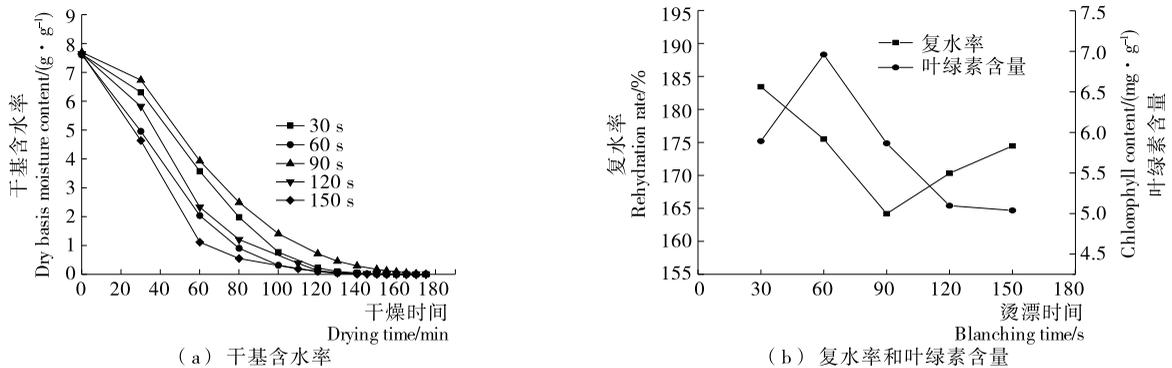


图 1 烫漂时间对红薯叶干基含水率、复水率和叶绿素含量的影响

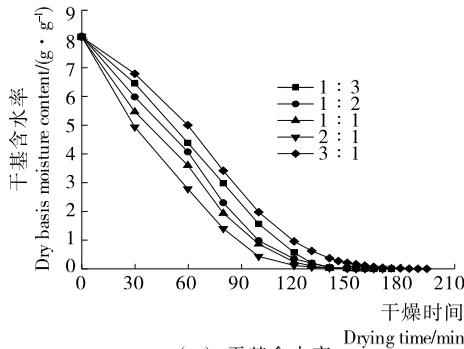
Figure 1 Effect of blanching time on moisture content, rehydration rate and chlorophyll content of sweet potato leaf

表 1 烫漂时间对红薯叶色泽的影响[†]

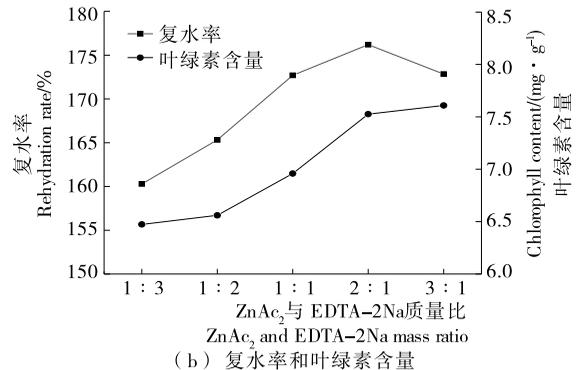
Table 1 Effect of blanching time on the color of sweet potato leaves

烫漂时间/s	<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>C</i>	ΔE
30	31.94±1.56 ^a	-4.49±0.71 ^{bc}	16.31±1.66 ^{ab}	16.83±0.80 ^{ab}	16.99±1.63 ^c
60	34.06±1.01 ^{bc}	-3.78±0.91 ^{ab}	16.20±0.80 ^b	16.66±0.63 ^b	14.99±0.92 ^{ab}
90	32.82±1.34 ^{ab}	-4.89±0.53 ^c	17.50±0.98 ^{ab}	18.18±0.26 ^{ab}	16.03±1.34 ^{bc}
120	32.52±1.86 ^a	-3.07±0.74 ^a	17.98±0.41 ^a	18.30±1.66 ^a	16.55±1.77 ^c
150	27.84±1.12 ^c	-3.11±0.42 ^a	13.68±1.08 ^c	14.28±1.031 ^c	21.54±1.25 ^a

[†] 字母不同表示差异显著($P<0.05$)。



(a) 干基含水率



(b) 复水率和叶绿素含量

图 2 ZnAc₂与 EDTA-2Na 质量比对红薯叶干基含水率、复水率和叶绿素含量的影响Figure 2 Effect of ZnAc₂ and EDTA-2Na mass ratio on dry soil water content, rehydration rate and chlorophyll content of sweet potato leaves

发,因此,ZnAc₂与 EDTA-2Na 质量比不易过高,否则不利于红薯叶的干燥历程^[22-23]。复水率随 ZnAc₂与 EDTA-2Na 质量比的增加先增大后减小,当 ZnAc₂与 EDTA-2Na 质量比为 1:2 时,复水率达到最大值(176%)。叶绿素含量随 ZnAc₂与 EDTA-2Na 质量比的增加而增大,当 ZnAc₂与 EDTA-2Na 质量比为 2:1 时,叶绿素含量增加开始变得缓慢,可能是烫漂液中的 ZnAc₂更有利于维护叶绿素结构,能较好地保留红薯叶中的叶绿素。

由表 2 可知,*L* 值随 ZnAc₂与 EDTA-2Na 质量比的增加先减小后增大,当 ZnAc₂与 EDTA-2Na 质量比为 1:1 时,*L* 值最低,为 31.06,此时红薯叶氧化最严重,颜色最黯淡;当适当地增加 ZnAc₂与 EDTA-2Na 质量比时,红薯叶表面鲜亮度开始升高,可能是热烫过程中,ZnAc₂在红薯叶表面形成一层保护膜,可防止干燥过程中氧气进入

红薯叶中,减小氧化程度^[17]。当 ZnAc₂与 EDTA-2Na 质量比为 2:1 时,*C* 值相对较大, ΔE 相对较小,结合干燥后红薯叶的干燥速率、复水率、叶绿素含量以及 *L* 值可知,ZnAc₂与 EDTA-2Na 质量比 2:1 为最佳的烫漂液比例,此时干燥效果最佳。

2.1.3 烫漂温度 由图 3 可知,烫漂温度对干基含水率影响不显著($P>0.05$),可能是高温使红薯叶结构变得更通透,细胞完全张开,水分更易蒸发,因此干燥过程中干燥速率较高。叶绿素含量随烫漂温度升高而减小;当烫漂温度为 80 °C 时,叶绿素含量最高,为 8.92 mg/g;当烫漂温度为 100 °C 时,叶绿素含量最低;烫漂温度越高,热敏性营养物质越易溶于水中或水溶性营养分子被蒸发至空气中,烫漂温度过高甚至会破坏细胞结构,导致营养物质含量降低。复水率随烫漂液温度的升高先减小后增

表 2 ZnAc₂与 EDTA-2Na 质量比对红薯叶色泽的影响[†]Table 2 Effect of mass ratio of ZnAc₂ and EDTA-2Na on the color of sweet potato leaves

ZnAc ₂ 与 EDTA-2Na 质量比	<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>C</i>	ΔE
1:3	33.23±0.83 ^{bc}	-2.93±0.64 ^a	7.57±0.93 ^c	8.13±1.09 ^c	20.34±1.78 ^b
1:2	32.80±1.07 ^c	-3.11±0.55 ^{ab}	8.37±1.59 ^{bc}	8.94±1.62 ^{bc}	20.45±0.9 ^b
1:1	34.06±1.01 ^d	-3.78±0.91 ^{ab}	16.20±0.80 ^a	16.66±0.63 ^{bc}	14.99±0.92 ^a
2:1	34.94±2.01 ^{ab}	-3.80±0.89 ^{ab}	9.44±1.84 ^{bc}	10.20±1.91 ^b	18.88±1.45 ^b
3:1	35.62±0.30 ^a	-4.50±1.11 ^c	11.04±1.1 ^{3b}	11.96±1.19 ^a	18.72±2.83 ^a

[†] 字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

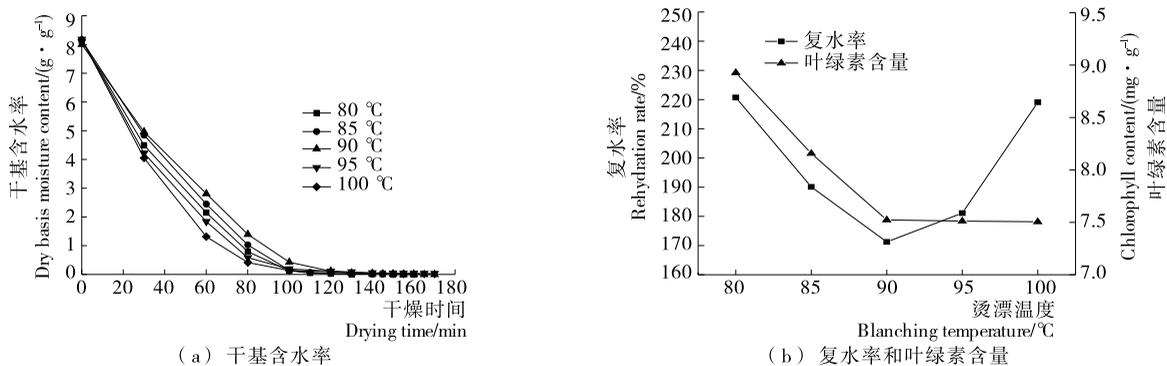


图 3 烫漂温度对红薯叶干基含水率、复水率和叶绿素含量的影响

Figure 3 Effect of blanching temperature on moisture content, rehydration rate and chlorophyll content of sweet potato leaf

大,当烫漂温度为 90 °C 时达到最小值(171%);烫漂温度越高,细胞损坏越大,干燥后产品复水率越小,细胞孔隙也就越大,部分细胞的孔隙可能受损,但开口吸水作用大于细胞受损吸水能力,因此吸水能力越强;继续升高烫漂温度,自由水越容易丢失,干燥速率相对较快,细胞孔隙处于开放状态,因此,当烫漂温度为 100 °C 时,复水率最高。

随烫漂温度的升高逐渐增大,红薯叶表面变得暗淡,当烫漂温度为 80 °C 时, *L* 值最高,为 38.86, ΔE 最低为 13.07, *C* 值相对较大。烫漂温度越高,烫漂过程中红薯叶褐变程度越大,叶子表面色素沉积,故干燥后的红薯叶表面颜色稍暗,色泽越差,另一方面可能是红薯叶在高温烫漂后进行冷却沥水过程中与空气接触,温差过大,加快褐变反应导致叶子表面色素沉积。因此选择最佳烫漂温度 80 °C。

由表 3 可知, *L* 值随烫漂温度的升高逐渐减小, ΔE

表 3 烫漂温度对红薯叶色泽的影响[†]

Table 3 Effect of blanching temperature on the color of sweet potato leaves

烫漂温度/°C	<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>C</i>	ΔE
80	38.86 ± 1.25 ^a	-4.13 ± 0.67 ^{bc}	10.07 ± 2.86 ^{ab}	10.92 ± 2.76 ^{ab}	13.07 ± 2.35 ^d
85	35.01 ± 2.65 ^b	-4.54 ± 0.92 ^c	11.18 ± 1.78 ^a	12.08 ± 1.49 ^a	19.70 ± 2.01 ^c
90	34.94 ± 2.01 ^b	-3.80 ± 0.89 ^{ab}	9.44 ± 1.84 ^b	10.20 ± 1.91 ^b	18.88 ± 1.45 ^c
95	30.19 ± 2.83 ^c	-5.11 ± 0.71 ^d	10.31 ± 1.82 ^{ab}	11.52 ± 1.82 ^{ab}	20.14 ± 3.41 ^b
100	29.15 ± 0.72 ^c	-3.63 ± 0.83 ^a	7.83 ± 1.36 ^c	8.64 ± 1.58 ^c	24.01 ± 3.24 ^a

[†] 字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

由单因素试验可得,最佳烫漂工艺为烫漂时间 60 s、烫漂液 ZnAc₂ 与 EDTA-2Na 质量比 2 : 1、烫漂温度 80 °C,对此工艺条件进行验证实验($n = 3$),结果表明,烫漂预处理后红薯叶干基含水率曲线与前期测得的重合,复水率为 189%,叶绿素含量为 8.92 mg/g, *L* 值为 38.86。

2.2 超声预处理对红薯叶热风干燥的影响

2.2.1 超声时间 由图 4 可知,干基含水率随超声时间的增长先减小后增大。当超声时间为 15 min 时,干基含水率最小,干燥速率最快;当超声时间 > 15 min 时,干基含水率突增;当超声时间为 30 min 时,干基含水率最大,所需干燥时间最长。复水率与叶绿素含量随超声时间的增长先增大后减小,当超声时间为 10 min 时均达最大值(叶绿素含量为 7.42 mg/g,复水率为 168%)。超声适当时间可以硫化红薯叶的结构组织,加快干燥过程中结合水分的散发^[24];超声波可穿透红薯叶表面,有助于细胞孔隙的

开放,超声时间过长会破坏叶子本身的组织结构及含有的营养物质分子,复水性变差,叶绿素含量也急剧下降。

由表 4 可知, *L* 值随超声时间的增长逐渐下降,红薯叶表面变得灰暗,从而影响色泽的感官评价^[25]。超声时间越长,与水接触时间越长,叶子表面氧化程度越高,就会失去红薯原有的色度。当超声时间为 5 min 时, *L* 值最大,与超声 10 min 的仅相差 1.47, ΔE 最小,与超声 10 min 的仅相差 1.24;当超声 10 min 时,色泽饱和度 *C* 值最高,再结合叶绿素含量和复水率,选择 10 min 为最佳超声时间。

2.2.2 超声功率 由图 5 可知,同一干燥时间下,超声功率越大,干基含水率越大;当超声功率为 200 W 时,干基含水率最小、干燥速率最快。叶绿素含量与复水率均随超声功率的升高先增大后减小,当超声功率为 300 W 时达到峰值,干燥效果最优。在一定范围内,超声功率越高,干燥速率越慢,影响后期红薯叶的干燥历程;超声功

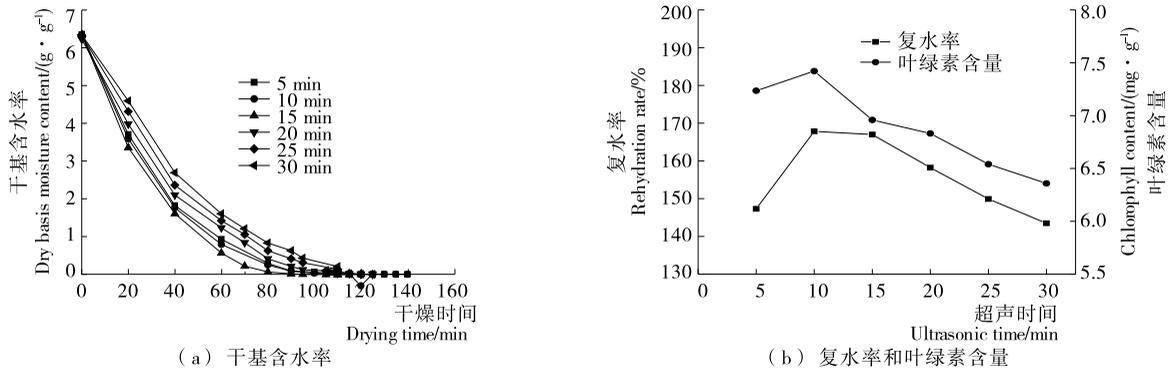


图4 超声时间对红薯叶干基含水率、复水率和叶绿素含量的影响

Figure 4 Effect of ultrasonic time on dry soil water content, rehydration rate and chlorophyll content of sweet potato leaves

表4 超声时间对红薯叶色泽的影响[†]

Table 4 Effect of ultrasonic time on the color of sweet potato leaves

超声时间/min	L	a	b	C	ΔE
5	33.93±2.44 ^a	-2.47±0.15 ^d	11.91±1.44 ^{ab}	12.17±1.41 ^{ab}	16.38±2.59 ^c
10	32.46±3.66 ^{ab}	-1.74±0.43 ^b	12.99±1.67 ^a	13.11±1.66 ^a	17.62±1.54 ^{bc}
15	30.55±3.86 ^{ab}	-1.51±0.92 ^{ab}	11.95±4.89 ^{ab}	12.13±4.70 ^{ab}	20.03±3.01 ^{bc}
20	29.72±2.91 ^b	-1.09±0.39 ^a	9.44±1.84 ^b	9.50±1.83 ^b	21.37±3.29 ^b
25	29.00±3.29 ^{bc}	-1.84±0.35 ^{bc}	11.57±1.00 ^{ab}	11.72±1.03 ^{ab}	20.28±2.91 ^{bc}
30	25.34±0.84 ^c	-2.42±0.27 ^{cd}	9.16±1.90 ^b	9.48±1.86 ^b	25.28±0.76 ^a

[†] 字母不同表示差异显著(P<0.05)。

率越大,穿透力越强,对红薯叶开孔作用越大;红薯叶具有一定的恢复能力,当大于恢复能力时,红薯叶无法平衡超声波的穿透作用,自身结构被破坏,复水性变差。

由表5可知,L值、C值随超声功率的增大先增大后减小,当超声功率为350W时取得最大值(L为37.87、C为14.79);当超声功率>350W时,L值和C值急剧下降。ΔE随超声功率的升高先减小后增大,当超声功率为300W时,L(35.22)、C和ΔE值与最大值相差较小。在一定范围内,超声功率的增大可有效防止红薯叶在干燥

过程中过度氧化,亮度减小。综合考虑,选取300W为最佳超声功率。

2.2.3 超声温度 由图6可知,在一定范围内,干基含水率随超声温度的升高而减小,可能是超声温度影响了超声波在红薯叶中的穿透能力,导致水分不能较快散失,造成后期干燥速率较低;当超声温度为40℃时,干基含水率最高。复水率随超声温度的升高先降低后增加,当超声温度为60℃时取得最小值(175%),与超声温度越高,细胞组织越疏松不符,可能是超声预处理影响了温度对

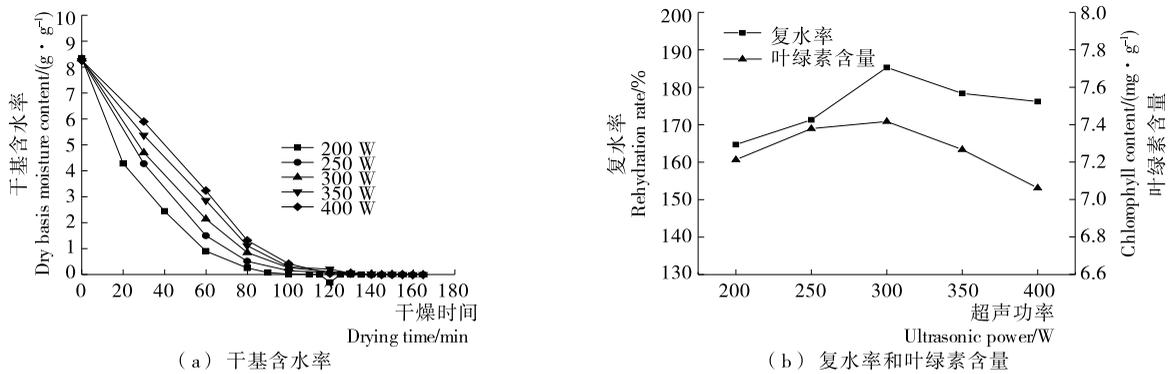


图5 超声功率对红薯叶干基含水率、复水率和叶绿素含量的影响

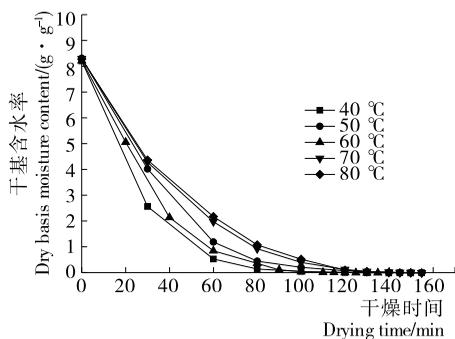
Figure 5 Effect of ultrasonic power on dry soil water content, rehydration rate and chlorophyll content of sweet potato leaves

表 5 超声功率对红薯叶色泽的影响[†]

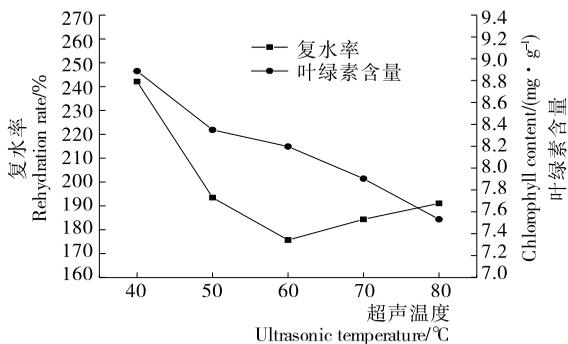
Table 5 Effect of ultrasonic power on color of sweet potato leaves

超声功率/W	<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>C</i>	ΔE
200	32.46±3.66 ^c	-1.74±0.43 ^a	12.99±1.67 ^b	13.11±1.66 ^b	17.62±1.54 ^a
250	32.38±4.83 ^c	-3.82±0.26 ^{bc}	12.81±2.41 ^b	13.38±2.27 ^b	17.33±5.00 ^a
300	35.22±4.51 ^a	-4.02±0.69 ^c	13.55±2.00 ^{ab}	14.08±2.10 ^{ab}	14.35±4.93 ^b
350	37.87±0.97 ^a	-4.00±0.55 ^c	14.24±1.20 ^a	14.79±1.29 ^a	11.68±1.23 ^c
400	34.77±2.66 ^b	-3.65±0.84 ^b	14.13±2.07 ^a	14.60±2.16 ^a	14.74±3.05 ^b

[†] 字母不同表示差异显著(P<0.05)。



(a) 干基含水率



(b) 复水率和叶绿素含量

图 6 超声温度对红薯叶干基含水率、复水率和叶绿素含量的影响

Figure 6 Effects of ultrasonic temperature on leaf water content, rehydration rate and chlorophyll content of sweet potato leaf dry water

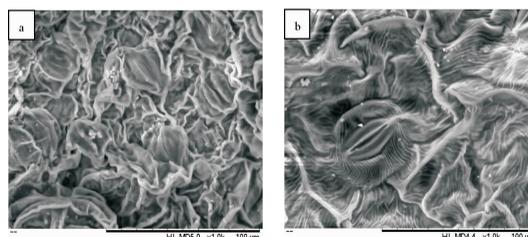
干燥后红薯叶的复水性。叶绿素含量随超声温度的升高逐渐减小,温度越高,叶绿素越易溶于水中,甚至蒸发散失,当超声温度为 40 °C 时取得最大值(8.89 mg/g)。

由表 6 可知,*L* 值随超声温度的升高而降低,当超声温度为 40 °C 时达最高(36.83),*C* 值相对较大, ΔE 相对最小,表明超声温度对红薯叶干燥后的色泽影响较大,随超声温度的增大,叶子表面色泽越暗淡。综合考虑,选取 40 °C 为最佳超声温度。

由单因素试验可知,最佳超声预处理工艺为超声时间 10 min、超声功率 300 W、超声温度 40 °C,对此工艺条件进行验证实验(*n*=3),结果表明,超声预处理后红薯叶干基含水率与前期测得的重合度达 99.9%,复水率为 242%,绿素含量为 8.88 mg/g,*L* 值为 36.83。

2.3 红薯叶微观结构分析

由图 7 可知,热烫干燥后红薯叶结构紧密,伸缩率



(a) 烫漂预处理 (b) 超声预处理

图 7 干燥红薯叶电镜图

Figure 7 Dry sweet potato leaf electron micrograph (1 000×)

高,细胞开孔率高,脆性较高,表面皱缩率更大,因经过热烫,红薯叶表面结构更柔软,干燥过程中遇到高温极易收缩,所以皱缩率更大。超声处理后红薯叶结构稍平坦均匀,组织整体结构较为疏松完整,并且细胞开孔稍大,复

表 6 超声温度对红薯叶色泽的影响[†]

Table 6 Effect of ultrasonic temperature on the color of sweet potato leaves

超声温度/°C	<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>C</i>	ΔE
40	36.83±0.41 ^a	-3.46±0.36 ^a	10.21±1.62 ^b	12.13±4.70 ^b	14.41±0.72 ^b
50	34.77±2.66 ^{ab}	-3.65±0.84 ^{ab}	14.13±2.07 ^a	14.60±2.16 ^a	16.91±1.41 ^b
60	34.04±1.54 ^{ab}	-3.25±1.02 ^a	10.14±1.57 ^b	10.67±1.65 ^b	14.35±4.93 ^{ab}
70	32.71±2.06 ^b	-4.02±1.44 ^{ab}	10.15±2.51 ^b	10.94±2.77 ^b	18.00±2.74 ^a
80	32.60±1.39 ^b	-4.71±0.65 ^a	9.49±1.15 ^b	10.59±1.32 ^b	18.24±1.45 ^a

[†] 字母不同表示差异显著(P<0.05)。

水率更高,因此组织面积孔隙率较低。

2.4 能耗计算

由表 7 可知,烫漂预处理工艺的前处理过程能耗高于超声预处理的,但干燥过程的能耗低,耗时少,总能耗比超声工艺的低 35.71 kJ/g。

表 7 烫漂与超声预处理下的能耗

Table 7 Comparison of energy consumption between blanching and ultrasonic pretreatment kJ/g

工艺	前处理能耗	干燥过程能耗	总能耗
烫漂	14.29±0.27	1 002.86±3.32	1 017.15±3.30
超声	12.86±0.42	1 040.00±4.24	1 052.86±4.67

3 结论

试验结果表明,红薯叶的最佳烫漂工艺为烫漂时间 60 s、烫漂液 ZnAc₂ 与 EDTA-2Na 质量比 2:1、烫漂温度 80 ℃,此时叶绿素含量为 8.92 mg/g,复水率为 189%,L 值为 38.86;红薯叶的最佳超声工艺为超声时间 10 min、超声功率 300 W、超声温度 40 ℃,此时叶绿素含量为 8.88 mg/g,复水率为 242%,L 值为 36.83。经过护色液烫漂处理的红薯叶干燥后的叶绿素含量和 L 值较高,而经过超声处理的红薯叶干燥后复水率较高;经超声处理的红薯叶干燥速率高于护色液处理的红薯叶的,皱缩率低;经烫漂处理的红薯叶前处理能耗比超声前处理的高 1.46 kJ/g,总能耗比超声预处理的低 35.71 kJ/g。试验为红薯叶干燥预处理工艺提供了新思路,但仅涉及一种干燥方法,后期可对多种干燥方式进行探究以提高红薯叶的干燥效率。

参考文献

[1] 涂宗财,傅志丰,王辉,等.红薯叶不同溶剂提取物抗氧化性及活性成分鉴定[J].食品科学,2015,36(17):1-6.

[2] SU Xiao-yu, JASON Griffin, XU Jing-wen, et al. Identification and quantification of anthocyanins in purple-fleshed sweet potato leaves[J]. Heliyon, 2019, 5(6): 1-6.

[3] 杜超杰,顾鹏威,李斌.采用红薯制备保健茶的方法:中国,107616280A[P]. 2018-01-23.

[4] 战意和,周杰,李作梅,等.一种红薯叶益生菌健康饮品及其制备方法:中国,106538917A[P]. 2017-03-29.

[5] 梅秀侠,刘赏占.一种红薯叶发酵饮料的制作工艺:中国,107549560A[P]. 2018-01-09.

[6] 梁宝峰,于继彤.红薯叶山楂玫瑰保健清酒及其酿造方法:中国,106554881A[P]. 2017-04-05.

[7] 张娜,郭楠楠,万炎炎.红薯叶戚风蛋糕的研制[J].粮食与油脂,2018,31(6):37-40.

[8] SUN Hong-nan, MU Tai-hua, XI Li-sha. New leafy vegetable resources-nutritional composition and application prospect of sweet potato leaves[J]. Agricultural Engineering

Technology Agricultural Products Processing Industry, 2013, 11: 45-49.

[9] SUN Hong-nan, MU Tai-hua, XI Li-sha, et al. Sweet potato (*Ipomoea Batatas* L.) leaves as nutritional and functional foods[J]. Food Chemistry, 2014, 156(8): 380-389.

[10] 李叶贝,任广跃,屈展平,等.燕麦马铃薯复合面条热风干燥特性及其数学模型研究[J].食品与机械,2018,34(1):49-53,208.

[11] 沈琪,李顺峰,王安建,等.双孢菇废弃物菇柄热风干燥特性及动力学模型[J].中国食品学报,2015,15(1):129-135.

[12] 司金金,辛丹丹,王晓芬,等.干燥方式对红薯叶粉品质特性的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2018,46(6):129-136,154.

[13] 马瑞,张钟元,赵江涛,等.超声辅助烫漂对黄花菜干制品色泽的影响[J].现代食品科技,2016,32(10):232-238.

[14] 田伏锦,刘云宏,黄隽妍,等.马铃薯超声强化冷风干燥及品质特性[J].食品科学,2019,40(5):85-94.

[15] 宋国胜,胡松青,李琳.超声波技术在食品科学中的应用与研究[J].现代食品科技,2008,24(6):609-612.

[16] 张莉会,廖李,汪超,等.超声和渗透预处理对干燥草莓片品质及抗氧化活性影响[J].现代食品科技,2018,34(12):196-203.

[17] 任广跃,刘军雷,刘文超,等.香椿芽热泵式冷风干燥模型及干燥品质[J].食品科学,2016,37(23):13-19.

[18] 罗归一,宋春芳,李臻峰,等.基于温度和功率控制的微波干燥研究[J].食品与机械,2018,34(6):58-63.

[19] 张乐,赵守涣,王赵改,等.板栗微波真空干燥特性及干燥工艺研究[J].食品与机械,2018,34(4):206-210.

[20] 屈展平,任广跃,李叶贝,等.燕麦添加量对马铃薯复合面条品质特性的影响[J].食品与机械,2019,35(1):186-192.

[21] LU Xue-feng, ZHOU Yang, REN Yu-peng, et al. Improved sample treatment for the determination of flavonoids and polyphenols in sweet potato leaves by ultra performance convergence chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2019, 169: 245-253.

[22] SITI Nurdjanh. Chlorophyll, ascorbic acid and total phenolic contents of sweet potato leaves affected by minimum post-harvest handling treatment [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 209(1): 012025.

[23] IRWAN M, ROSMAYATI, HANAFIAH D S, et al. Analysis of changes in morphological characteristics of leaves and stems in some sweet potato cultivars (*Ipomoea batatas* L.) from Simalungun and Dairi highlands planting in the lowlands[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 260(1): 012150.

[24] 徐雅琴,杜明阳,杨露,等.超声波处理对黑加仑果实多糖性质与生物活性的影响[J].食品科学,2019,40(15):148-153.

[25] 孙畅莹,刘云宏,曾雅,等.直触式超声强化热风干燥梨片的干燥特性[J].食品与机械,2018,34(9):37-42.