

# 食用槟榔干燥和烟熏特性研究

吴 硕<sup>1,2,3</sup>,李宗军<sup>1,2,\*</sup>,谭 雅<sup>1,2</sup>,杜 莎<sup>1,2</sup>,黄润庭<sup>1,2</sup>,伍 婧<sup>1,2</sup>

(1.湖南农业大学食品科学技术学院,湖南长沙 410128;

2.食品科学与生物技术湖南省重点实验室,湖南长沙 410128;

3.海南联合槟榔产业工程研究中心,海南海口 570100)

**摘要:**为了改善槟榔干果品质,结合新型环保槟榔烘烤炉对槟榔干燥和烟熏特性进行研究。本实验通过对干燥温度、湿度和风速的调控以及烟熏过程关键点的控制,对比质构数据和槟榔最大周长变化,得出最优烘烤工艺参数。在温度为55℃、湿度60%RH和风速1.2m/s的烘烤环境下能在较短的时间内获得较好品质的槟榔干果。通过对烟熏时间的控制,在保证烟熏风味的同时能减少1/2的烟熏时间,降低有害物质残留量和槟榔黑果的硬度,提高了食用槟榔干果的品质。

**关键词:**槟榔;加工;干燥;熏烤

## Study on drying and smoking characteristic of betel nut

WU Shuo<sup>1,2,3</sup>,LI Zong-jun<sup>1,2,\*</sup>,TAN Ya<sup>1,2</sup>,DU Sha<sup>1,2</sup>,HUANG Run-ting<sup>1,2</sup>,WU Jing<sup>1,2</sup>

(1.College of Food Science and Technology Hunan Agricultural University,Changsha 410128,China;

2.Hunan Province Key Laboratory of Food Science and Biotechnology,Changsha 410128,China;

3.Hainan Union Betelnut Industry Engineering Research Center,Haikou 570100,China)

**Abstract:**To improve the quality of edible betel nuts,the edible betel nut drying and smoking features in combination with new environmentally friendly edible betel nuts oven were studied. By controlling drying temperature,humidity and wind speed and the key point of the smoking process and by comparing TPA test results and changes of betel maximum circumference,the optimal baking process parameters were obtained. At the roasting environment:temperature at 55℃,humidity at 60%RH,and wind speed at 1.2 m/s,the betel nut could be produced with better quality in a shorter period of time. By controlling smoking time,the smoky flavor was maintained and the smoke time was reduced 1/2 as well,which reduced the amount of harmful residues and hardness of betel nut,and improved the quality of edible betel nut.

**Key words:**betel nut;processing;dry;smoked

中图分类号:TS201.1

文献标识码:B

文章编号:1002-0306(2016)04-0288-07

doi:10.13386/j.issn1002-0306.2016.04.049

槟榔是棕榈科植物槟榔树的种子,果皮纤维质、肉质坚硬不易破碎<sup>[1]</sup>。当前对槟榔的利用主要有药用和食用两种方式,槟榔是四大南药(槟榔、砂仁、益智、巴戟天)之首,其种子、果皮、花等均可入药<sup>[2]</sup>;在东南亚、南太平洋诸岛及周边地区,包括我国的台湾、海南等省,人们普遍喜欢嚼食槟榔,因此各地所产槟榔绝大部分以咀嚼品的形式消费<sup>[3]</sup>。目前,槟榔已成为仅次于尼古丁、乙醇和咖啡因的世界第四大嗜好物品<sup>[4]</sup>。

海南槟榔成熟期为九月至十二月,槟榔鲜果经过熏烤加工成干果,干燥过程未经烟熏的为白果,经过熏烤入味的为黑果。用于初加工的主要是长椭圆形和长卵形果,此类果槟榔碱含量较高,刺激性强,

容易醉人,烘干后易收缩,纹路细腻,果形漂亮,深受消费者喜爱<sup>[5]</sup>。一般来说,槟榔干果长径比越大,纹路越深,槟榔品质越好<sup>[6]</sup>。传统熏烤工艺采用土炉熏烤,这种熏烤模式是通过在地面砌成土灶,在土灶上铺上一层铁丝网,铁丝网上放置槟榔鲜果,铁丝网下燃烧橡胶木,产生烟雾对槟榔进行熏烤,土灶上方无遮挡,烟雾直接排入空气中,卫生、安全生产条件较差且造成严重的环境污染<sup>[7]</sup>。经政府支持,槟榔初加工的出现转型和技术升级,原始落后的土炉被机械化自动化的设备替代。目前已有关于槟榔干燥的相关研究<sup>[8]</sup>,但还未有槟榔烟熏特性的相关研究,本实验在槟榔产地海南省万宁市进行,结合新型环保槟榔烘烤炉进行槟榔干燥和烟熏特性的研究,分析了熏

收稿日期:2015-07-29

作者简介:吴硕(1990-),女,硕士研究生,研究方向:食品生物技术,E-mail:momomows@163.com。

\* 通讯作者:李宗军(1968-),男,博士,教授,研究方向:食品生物技术,E-mail:hnlizongjun@163.com。

烤工艺参数包括温度、湿度和风速等对槟榔干果品质量影响和槟榔熏烤的规律,为槟榔熏烤设备参数的调整提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

槟榔鲜果 海南省万宁市采购;橡胶木片与木糠 海南省万宁市采购。

KW-1000DA 数显恒温水浴锅 上海浦东物理光学仪器厂;TA.XT.plus Texture Analyser 物性测试仪 上海仪电科学仪器股份有限公司;EPS-302 电子天平 长沙湘平科技发展有限公司;实验用环保型槟榔熏烤炉 万宁宾萃科技有限公司;实验用环保型槟榔熏烤炉 采用的是烟热分离的熏烤方法,热量和烟雾分为不同发生室,通过管道向炉体下方输送热能和烟雾,烟雾和热能自下而上通过炉体从排烟口排出,炉体中央横着放置旋转滚筒,有2个果料槽,满装载量为15 kg见图1。熏烤炉通过数显温度控制器调控温度(精度 $\pm 0.2$  °C),数显湿度控制器调控湿度(精度 $\pm 0.5\%$  RH),变频器调节风机频率(精度 $\pm 0.2$  m/s)。

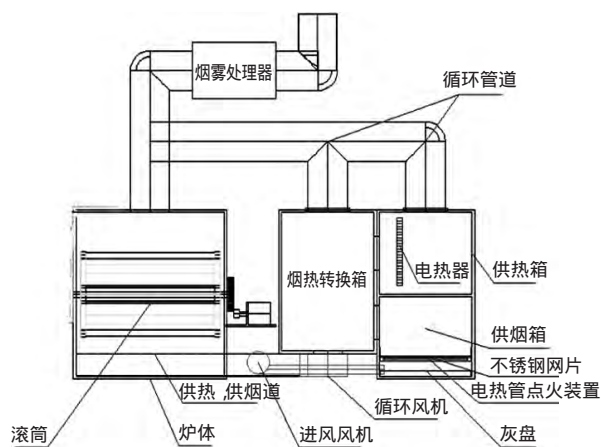


图1 实验用环保型槟榔熏烤炉

Fig.1 Environmentally friendly experiment using edible betel nuts oven

### 1.2 实验方法

1.2.1 实验步骤 槟榔初加工流程 槟榔挑选→洗净→杀青→干燥→烟熏→包装。

挑选产自海南省万宁市,挑选最大周长和长度一致,颜色鲜绿,椭圆形,无霉变破败带果蒂的槟榔做为实验材料。在水浴锅中杀青,经预实验确定杀青温度 $100$  °C,时长为 $25$  min,杀青时水应没过槟榔。槟榔杀青后捞出晾干,然后放置于实验用槟榔熏烤炉的果料槽中进行干燥,按实验要求调节槟榔熏烤炉的温度、湿度和风速,每组测量三个样品,取平均数,干燥至含水率白果为 $20\% \pm 2\%$ ,黑果为 $25\% \pm 2\%$ 时取出做质构测试<sup>[9]</sup>。本次实验选择满装载量进行熏烤,滚筒每小时旋转一周。

#### 1.2.2 单因素实验

1.2.2.1 温度对干燥特性的影响 杀青后槟榔放置于实验用槟榔熏烤炉的果料槽中进行干燥,设定湿度 $60\% \pm 0.5\%$  RH、风速 $(1.2 \pm 0.2)$  m/s,温度分别为 $45$ 、

$50$ 、 $55$ 、 $60$ 、 $65$  °C。

1.2.2.2 湿度对干燥特性的影响 杀青后槟榔放置于实验用槟榔熏烤炉的果料槽中进行干燥,设定温度 $(55 \pm 0.2)$  °C、风速 $(1.2 \pm 0.2)$  m/s,湿度分别为 $30\%$ 、 $40\%$ 、 $50\%$ 、 $60\%$ 、 $70\%$  RH。

1.2.2.3 风速对干燥特性的影响 杀青后槟榔放置于实验用槟榔熏烤炉的果料槽中进行干燥,设定温度 $(55 \pm 0.2)$  °C、湿度 $60\% \pm 0.5\%$  RH,风速分别为 $0$ 、 $0.6$ 、 $1.2$ 、 $1.8$ 、 $2.4$  m/s。

1.2.3 正交实验 正交实验以温度、湿度、风速为变量,考察此3个因素对槟榔品质的影响。以咀嚼性和最大周长作为评价指标,相对槟榔的高硬度,咀嚼性较低的更能给食用者带来柔和的口,能有效减少槟榔纤维对口腔的刺激;市场普遍认为最大周长越小即长径比越大,槟榔品质越好。

表1 正交实验因素水平表

Table 1 Factors and levels of orthogonal array design

水平	因素		
	A 温度(°C)	B 湿度(%RH)	C 风速(m/s)
1	50	50	0.6
2	55	60	1.2
3	60	70	1.8

1.2.4 烟熏实验 杀青后槟榔放置于实验用槟榔熏烤炉的果料槽中进行干燥,设定温度 $(55 \pm 0.2)$  °C、湿度 $60\% \pm 0.5\%$  RH和风速 $(1.2 \pm 0.2)$  m/s。制作黑果需要对槟榔进行烟熏,在烟雾发生室内燃烧橡胶木片与木糠,产生的烟雾由风机带动气流通过炉体下方的管道输送至炉体内部。综合干燥条件与槟榔形态变化规律,优化烟熏组是在环境湿度与槟榔湿度达到平衡状态、槟榔干基含水率在 $24\%$ 左右、槟榔果蒂开始收缩时进行上烟,槟榔干基含水率降至 $66\%$ 左右,槟榔表面硬化后停止熏烤,烟熏时间 $40 \sim 45$  h;全程上烟组是使用环保型槟榔熏烤炉对槟榔进行全程上烟熏烤,烟熏时间 $96 \sim 100$  h;传统烟熏组是使用土灶对槟榔进行熏烤<sup>[7]</sup>,烟熏时间 $110 \sim 120$  h。实验通过对比优化烟熏、全程上烟和传统烟熏的槟榔干果品品质证明了优化烟熏的可行性。

#### 1.2.5 槟榔的品质分析

1.2.5.1 水分含量的测定 参照GB/T 5009.3-2003食品中水分的测定方法<sup>[10]</sup>。每3 h测量一次,每次测量三个样品取平均数。

1.2.5.2 最大周长的测定 游标卡尺测出最大周长,用棉线绕最大周长一周并标记,再用游标卡尺测量标记长度,每3 h测量一次,每次测量三个样品取平均数。

1.2.5.3 质构测量 TPA模式测量 将槟榔横置于探头下,测量速度为 $5$  mm/s,测量模式为strain、 $10\%$ 。每组测量三个样品,取平均数。

1.2.5.4 苯并( $\alpha$ )芘含量的测定 参照GB/T 5009.27-2003食品中苯并芘的测定方法<sup>[11]</sup>。

1.2.5.5 二氧化硫含量 参照NY/T 1435-2007中二

氧化硫总量的测定方法<sup>[12]</sup>。

1.2.5.6 甲醛含量 参照NY 5172-2002中甲醛的测定方法<sup>[13]</sup>。

1.2.5.7 铅含量 参照GB 5009.12-2010中铅的测定方法<sup>[14]</sup>。

1.2.6 干基含水率曲线 任意干燥时刻 $t$ 时的干基含水率 $M$ 采用式(1)计算<sup>[6]</sup>：

$$M_t = \frac{m - m_c}{m_c} \quad \text{式(1)}$$

式(1)中： $m$ 为在任意干燥 $t$ 时刻的物料质量 $g$ ； $m_c$ 为物料的干物质质量 $g$ 。

1.2.7 干燥速率曲线 任意干燥时刻 $t$ 时的干燥速率 $DR$ 采用式(2)计算<sup>[6]</sup>：

$$DR = \frac{M_{t1} - M_{t2}}{t_2 - t_1} \quad \text{式(2)}$$

式(2)中： $M_{t1}$ 为 $t_1$ 时刻的槟榔干基含水率( $g/g$ )； $M_{t2}$ 为 $t_2$ 时刻的槟榔干基含水率( $g/g$ )。

### 1.3 数据处理

实验结果数据用Excel 2007以及Origin 8.0软件进行统计分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 温度对干燥特性的影响

不同温度条件下槟榔干燥曲线和槟榔最大周长收缩情况如图2和图3所示。

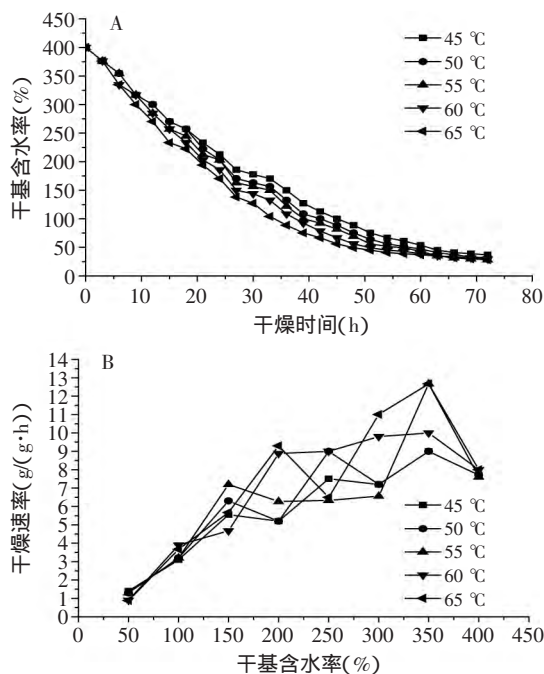


图2 不同温度条件干燥曲线

Fig.2 Drying curves of betel nut under different temperatures

注：A.干基含水率曲线，B.干燥速率曲线。

由图2可以看出，槟榔的含水率随着干燥时间的增长而降低，干燥温度越高，达到相同的含水率所需的时间越短。槟榔干燥预热时间较短，一般忽略不计。由于经过了杀青，槟榔经沸水蒸煮过后水分蒸发较快，槟榔堆积的内部湿度要高于环境湿度，槟榔堆

积的内部湿度与环境湿度趋于平衡后干燥速率开始升高。由图3可以看出，槟榔堆积的内部湿度与干燥环境湿度达到平衡这个过程，槟榔最大周长变化较小，温度越低达到平衡状态所需时间越长，这个阶段过后，槟榔含水率迅速降低，干燥速率达到最高。

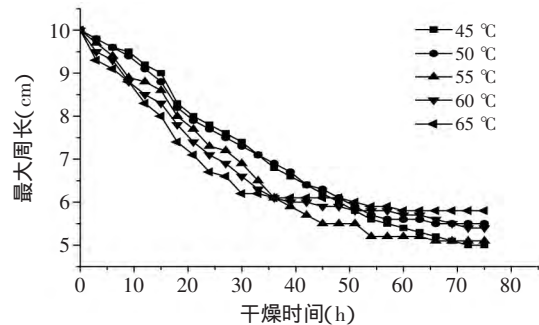


图3 不同温度最大周长变化曲线

Fig.3 Maximum perimeter change curve of betel nut under different temperatures

干燥12 h后，槟榔干基含水率在240%左右，槟榔果蒂处开始出现收缩纹路，原因是槟榔果蒂与槟榔枝相连，是槟榔果成熟度最低的部位，也是槟榔纤维较软的部位。

干燥时长12~45 h期间，槟榔最大周长和槟榔干燥速率随着含水率的降低整体呈下降趋势，槟榔最大周长收缩程度随着温度的升高而变大。槟榔干燥至60 h后，槟榔干基含水率在50%左右，不同温度条件下干燥速率基本一致，此时槟榔形态已经不再发生变化。

槟榔烘干后进行质构测量，主要影响槟榔品质的参数是硬度、弹性和咀嚼性。

表2 不同温度下槟榔干果质构对比

Table 2 TPA test result of betel nut under different temperatures

温度(°C)	硬度( $10^5 N$ )	弹性(mm)	咀嚼性( $10^5 N$ )
45	3.89±0.02 <sup>a</sup>	0.88±0.02 <sup>cd</sup>	3.59±0.02 <sup>a</sup>
50	2.62±0.02 <sup>de</sup>	1.02±0.03 <sup>a</sup>	2.53±0.03 <sup>d</sup>
55	2.81±0.02 <sup>d</sup>	0.86±0.02 <sup>de</sup>	2.02±0.02 <sup>e</sup>
60	3.43±0.03 <sup>c</sup>	0.92±0.04 <sup>c</sup>	3.17±0.04 <sup>bc</sup>
65	3.75±0.04 <sup>ab</sup>	1.00±0.04 <sup>ab</sup>	3.20±0.03 <sup>b</sup>
$p$ 值	0.009**	0.0002**	0.011*

注：同列字母不同表示差异显著( $p < 0.05$ )；\* 差异显著  $p < 0.05$ ；\*\* 差异极显著  $p < 0.01$ ，表3、表4同。

由表2可知，在55 °C的情况下，槟榔干果咀嚼性最低，槟榔品质最佳。由显著性分析可知，温度对槟榔干果硬度、弹性有极显著影响，对咀嚼性有显著影响。由于45 °C组干燥时间要比55 °C组时间长，表皮纤维硬化，硬度和咀嚼性比55 °C组要大。55 °C后，温度越高，槟榔干果硬度和咀嚼性越大，原因是槟榔干燥过程中随着温度的升高，槟榔表皮硬化程度越高，干燥中后期内部水分还未完全排出表皮部分就已硬

化,内部水分排出速率降低,干燥时间延长,表面硬化程度加剧。因此,选择50、55、60℃作为温度水平进行正交实验。

## 2.2 湿度对干燥特性的影响

不同湿度条件下槟榔温度曲线和槟榔最大周长收缩情况如图4和图5所示。

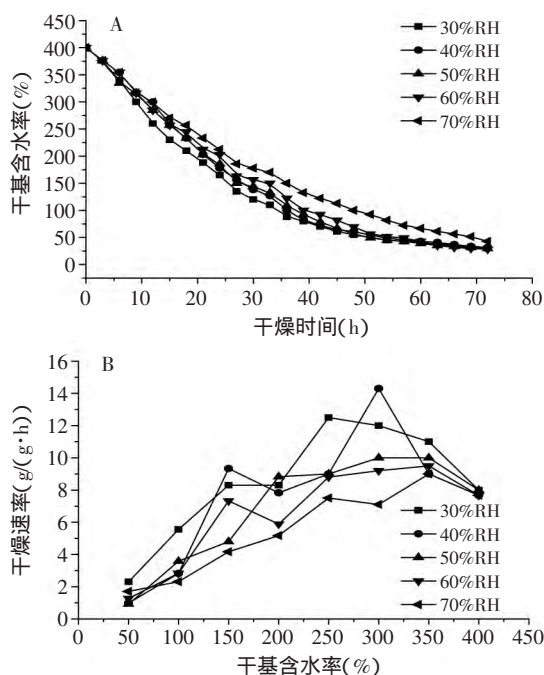


图4 不同湿度条件干燥曲线

Fig.4 Drying curves of betel nut under different humidity  
注:A.干基含水率曲线,B.干燥速率曲线。

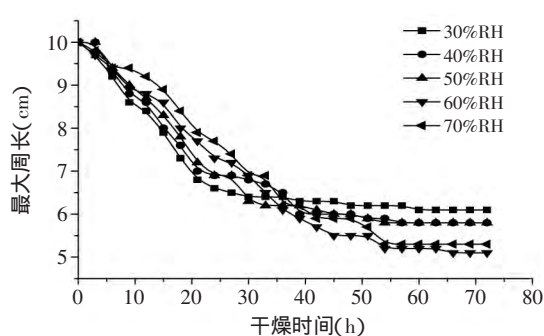


图5 不同湿度条件下最大周长变化曲线

Fig.5 Maximum perimeter change curve of betel nut under different humidity

如图4所示,在相同的温度、风速和初始含水率的条件下,湿度越高,干燥至相同含水率所需的时间越长。在环境湿度和槟榔湿度之间没有达到平衡之前,存在一个湿度梯度差,这是推动内部水分由内向外迁移的动力之一,梯度差越大其推动力也就越大。湿度条件为70%RH时,槟榔干燥速率明显要比其他组慢,原因是干燥环境湿度过高,槟榔内部水分不能快速排出,水分蒸发速度较慢。随着湿度的降低,湿度梯度差逐渐加大,物料干燥时间逐渐缩短,但如果环境湿度过低,表面蒸发速度大于内部水分迁移速

度,造成表面硬化,内部水分难以散发出来,如图5所示,30%RH的湿度条件下,槟榔由于表面水分含量蒸发过快而硬化,40h后槟榔表面已硬化,最大周长不再变化。

表3 不同湿度下槟榔干果质构对比

湿度(% RH)	硬度( $10^5$ N)	弹性(mm)	咀嚼性( $10^5$ N)
30	4.15±0.02 <sup>a</sup>	0.89±0.02 <sup>a</sup>	3.23±0.02 <sup>a</sup>
40	3.92±0.02 <sup>ab</sup>	0.89±0.02 <sup>a</sup>	3.06±0.02 <sup>ab</sup>
50	3.65±0.02 <sup>c</sup>	0.88±0.03 <sup>a</sup>	2.63±0.02 <sup>c</sup>
60	2.81±0.02 <sup>de</sup>	0.86±0.02 <sup>a</sup>	2.02±0.02 <sup>de</sup>
70	2.92±0.03 <sup>d</sup>	0.90±0.04 <sup>a</sup>	2.21±0.03 <sup>d</sup>
p值	0.0026**	0.4833	0.0101*

如表3所示,在60%RH的情况下,槟榔干果硬度和咀嚼性最低,槟榔品质最佳。由显著性分析可知湿度对槟榔干果硬度有极显著影响。60%RH开始,相对湿度越低,烘烤出来的槟榔干果硬度和咀嚼性越高,原因是干燥过程湿度越低,水分散失越快,槟榔表面硬化越迅速,70%RH时由于高湿度水分难以散发,干燥时间极大延长,槟榔表面经过持续烘烤硬化程度比60%RH组要高。因此,选择50%、60%、70%RH作为湿度水平进行正交实验。

## 2.3 风速对干燥特性的影响

不同风速条件下槟榔干燥曲线和槟榔最大周长收缩情况如图6和图7所示。

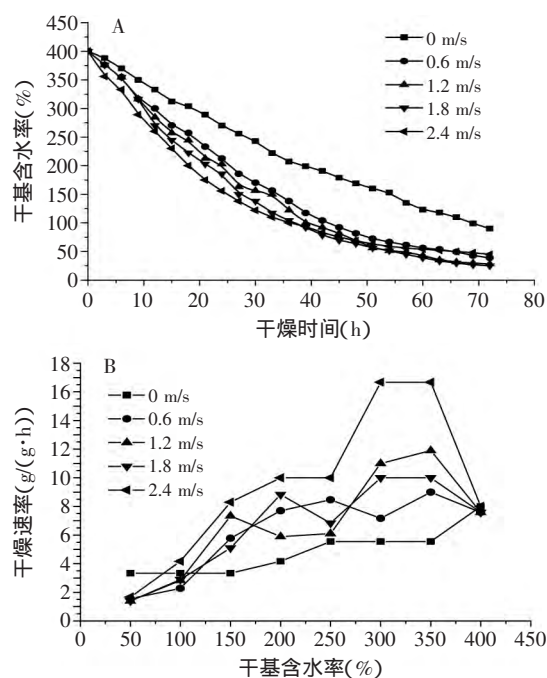


图6 不同风速条件干燥曲线

Fig.6 Drying curves of betel nut under different wind speed  
注:A.干基含水率曲线,B.干燥速率曲线。

如图6所示,在相同的温度、湿度和初始含水率的条件下,随着风速的增加,槟榔表面的水分蒸发速

度加快,所需的干燥时间越短。风速过小时,由于湿度和温度梯度差而产生的水蒸气不能及时的被带离干燥区域,导致干燥速率减慢,干燥时间延长;风速过大会迅速带走干燥环境中的水蒸气从而导致槟榔表皮硬化,内部水分难以排出,槟榔品质不佳。如图7所示,在2.4 m/s的风速条件下,槟榔迅速收缩,表皮硬化后,最大周长变化非常的小,收缩程度相对于其他组有明显差异。

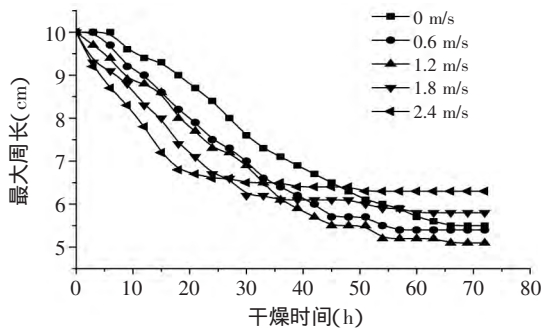


图7 不同风速条件下最大周长变化曲线

Fig.7 Maximum perimeter change curve of betel nut under different wind speed

表4 不同风速下槟榔干果质构对比

Table 4 TPA test result of betel nut under different wind speed

风速(m/s)	硬度(10 <sup>5</sup> N)	弹性(mm)	咀嚼性(10 <sup>5</sup> N)
0	3.52±0.02 <sup>c</sup>	0.90±0.02 <sup>bc</sup>	2.71±0.03 <sup>bc</sup>
0.6	3.34±0.03 <sup>cd</sup>	0.84±0.02 <sup>de</sup>	2.42±0.03 <sup>cd</sup>
1.2	2.81±0.02 <sup>e</sup>	0.86±0.02 <sup>d</sup>	2.02±0.02 <sup>e</sup>
1.8	4.05±0.05 <sup>a</sup>	1.01±0.04 <sup>b</sup>	3.70±0.05 <sup>a</sup>
2.4	3.84±0.04 <sup>ab</sup>	1.22±0.02 <sup>a</sup>	3.71±0.04 <sup>b</sup>
p值	0.021*	0.055	0.024*

如表4所示,在1.2 m/s的情况下,槟榔干果硬度和咀嚼性最低,槟榔品质最佳。由显著性分析可知风速对槟榔干果硬度、弹性和咀嚼性有极显著影响。0 m/s条件下,风速过低难以带走水分从而导致湿度过高,干燥时间极大延长,槟榔表面硬化程度比1.2 m/s组要高;风速在1.8 m/s时,迅速带走了干燥环境中的水分,槟榔表面迅速硬化但内部水分还未排出,干果硬度比1.2 m/s组的高出1.4倍。因此,选择0.6、1.2、1.8 m/s作为风速水平进行正交实验。

#### 2.4 槟榔干燥工艺正交实验结果

正交实验方案及结果见表5,实验方差分析见表6。

由表5可知,影响槟榔干果咀嚼性和最大周长收缩的因素主次顺序为A>C>B,即温度>风速>湿度,根据咀嚼性指标和最大收缩程度得到的优化水平组合为A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C<sub>2</sub>,即干燥条件为温度55℃、湿度60%RH、风速1.2 m/s。在此条件下进行三次验证实验,得到槟榔干果咀嚼性(10<sup>5</sup> N)为2.02±0.02,最大周长收缩为5.34 cm,优于表5中每一组实验结果,因此,该优化组合为最佳选择。

#### 2.5 槟榔烟熏条件的选择

经过干燥特性的结果进行槟榔烟熏条件的选

表5 正交实验方案及结果

Table 5 Orthogonal array design scheme and results

实验号	A	B	C	咀嚼性(10 <sup>5</sup> N)	最大周长收缩(cm)
1	1	1	1	3.94±0.02	3.90±0.11
2	1	2	2	2.53±0.03	4.40±0.21
3	1	3	3	3.18±0.03	4.17±0.08
4	2	1	2	2.63±0.02	5.02±0.23
5	2	2	3	3.70±0.04	4.53±0.14
6	2	3	1	3.12±0.05	4.33±0.33
7	3	1	3	4.03±0.04	3.82±0.15
8	3	2	1	3.76±0.03	4.20±0.12
9	3	3	2	3.88±0.03	4.31±0.09
k <sub>1</sub>	3.22	3.53	3.84		
咀嚼性(10 <sup>5</sup> N)	k <sub>2</sub>	3.15	3.33	3.23	
	k <sub>3</sub>	3.89	3.39	3.19	
	R	0.74	0.20	0.65	
最大周长收缩(cm)	k <sub>1</sub> '	4.16	4.25	4.14	
	k <sub>2</sub> '	4.63	4.38	4.57	
	k <sub>3</sub> '	4.11	4.27	4.17	
	R'	0.52	0.13	0.43	

表6 正交实验结果方差分析

Table 6 Analysis of variance for the results of orthogonal array design

指标	因素	偏差平方和	自由度	F比	F临界值
咀嚼性(10 <sup>5</sup> N)	A	1.005	2	1.665	5.140
	B	0.065	2	0.108	5.140
	C	0.741	2	1.227	5.140
最大周长收缩(cm)	A	0.490	2	0.013	19.00
	B	0.029	2	0.001	19.00
	C	0.351	2	0.009	19.00

择,在温度为55℃、湿度60%RH、风速1.2 m/s的干燥条件下进行槟榔熏烤。

由图8可以看出,槟榔进行烟熏的情况下干燥速率要比不进行烟熏的慢,原因是燃烧橡胶木片产生的烟雾湿度较高,达到槟榔湿度与环境湿度平衡的时间比不烟熏达到湿度平衡所需的时间长,槟榔在干燥前期由于湿度太高烟雾无法附着,上烟效果不明显,为非必要烟熏时间。随着含水率降低,环境湿度与槟榔湿度达到平衡状态后,槟榔开始收缩,烟雾能快速渗透至槟榔内部,槟榔内部由于烟雾渗透呈浅棕色,烟熏风味浓郁。熏烤后期槟榔表皮硬化,表面已经布满烟垢,继续烟熏不能渗透到槟榔内部,只能附着于表面,不再提升槟榔黑果烟熏风味,这个阶段属于非必要烟熏时间,占全程干燥时间的1/2。由图9可以看出,经过长时间的熏烤,槟榔表皮附着大量焦油并硬化,烟熏的组要比不进行烟熏的组最大周长更快达到稳定状态,但最大周长变化没有显著性差异,不影响槟榔品质,优化烟熏组在获得足够的烟熏风味的前提下减少了干燥时间并获得品质更佳的黑果。

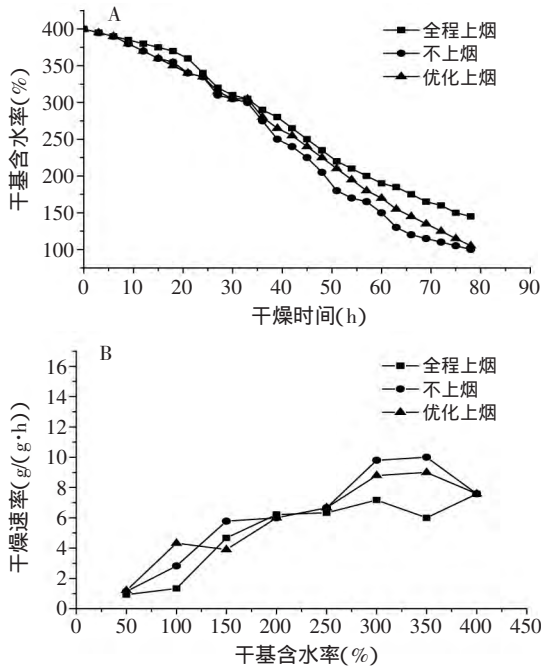


图8 不同烟熏条件下干燥曲线

Fig.8 Drying curves of betel nut under different smoked conditions

注:A.干基含水率曲线;B.干燥速率曲线。

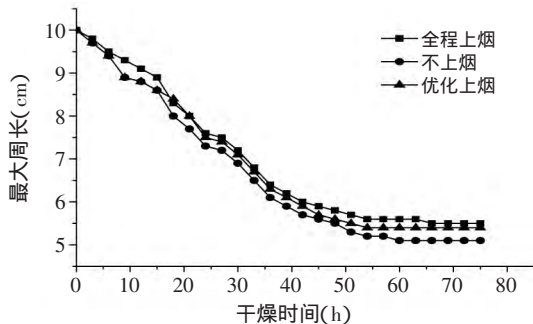


图9 不同烟熏条件下最大周长变化曲线

Fig.9 Maximum perimeter change curve of betel nut under different smoked condition

为了验证减少烟熏时长是否能提高槟榔品质,对不同烟熏条件的槟榔干果做质构测试。

表7 不同烟熏条件质构对比

Table 7 TPA test result of betel nut under different smoked condition

烟熏程度	硬度(10 <sup>5</sup> N)	弹性(mm)	咀嚼性(10 <sup>5</sup> N)
不烟熏	2.81±0.02	0.86±0.02	2.02±0.02
优化烟熏	3.06±0.02	0.90±0.02	2.41±0.03
全程烟熏	3.32±0.02	0.99±0.03	2.81±0.02
传统烟熏	3.73±0.03	0.98±0.04	3.23±0.03
p值	0.005**	0.001**	0.003**

由表7可以看出槟榔经过烟熏后硬度和咀嚼性会增加,原因是槟榔经过烟熏后表面附着的大量焦油,烟垢的附着增加了槟榔硬度和咀嚼性。全程烟熏

的槟榔比优化烟熏时间的槟榔硬度高,全程烟熏的槟榔在熏烤后期烟雾已经无法渗透槟榔表面而附着在槟榔表面导致槟榔硬度增加。优化烟熏能减少烟垢的附着和减少有害物质残留量,提升了黑果食用的安全性。由显著性分析可知,烟熏过程对硬度、弹性和咀嚼性有极显著性影响,对比优化烟熏与传统烟熏的质构数据,槟榔黑果降低了近1/5的硬度和咀嚼性,减少了槟榔咀嚼时对口腔黏膜的伤害,也提升了槟榔口感,槟榔品质有较大提升。

表8 不同烟熏条件有害物质残留量

Table 8 Harmful material residues of betel nut under different smoked condition

烟熏程度	苯并(α)芘(μg/kg)	甲醛(mg/kg)	二氧化硫(mg/kg)	铅(mg/kg)
不烟熏	0.00	0.00	13.52±0.12	0.47±0.02
优化烟熏	0.00	0.00	10.22±0.14	0.27±0.01
全程烟熏	0.86±0.17	0.00	11.12±0.21	0.36±0.03
传统烟熏	25.32±0.11	35.04±0.03	19.70±0.35	0.98±0.12

由表8得出,减少烟熏时间能减少有害物质残留量。苯并(α)芘、甲醛和二氧化硫是槟榔熏烤过程中附着的最主要的有害残留物。苯并(α)芘是一种多环芳烃,通过食物或饮水进入体内,经过血液循环很快遍布于身体各个部位,是导致人体病变的诱变剂和致癌物<sup>[15]</sup>。二氧化硫对神经系统、呼吸系统、心血管系统、消化系统均有毒性<sup>[16]</sup>。甲醛的主要危害表现为对皮肤粘膜的刺激作用,烘烤过程高温会使烘烤产品甲醛含量加大。采用烟热分离的熏烤模式能极大的降低有害物质残留量,由于较好的控制了温度,优化烟熏的槟榔黑果不含有甲醛。在减少烟熏时间后槟榔干果未检出苯并(α)芘。参照GB2762-2012《食品安全国家标准—食品污染物限量》中谷物及其制品苯并芘限量指标5.0 μg/kg<sup>[17]</sup>,传统熏烤的槟榔干果苯并芘含量远远超出了标准限量,采用烟热分离模式熏烤的槟榔干果苯并芘含量均在中国相关控制标准之内。二氧化硫和铅由于槟榔鲜果中就有比较高的含量<sup>[18]</sup>,且由于槟榔鲜果存在个体差异,含量有所不同,熏烤过程并无大量附着,含量在DB46/T75-2007《食用槟榔》限量之内。

### 3 结论

实验结果表明,影响槟榔干果咀嚼性和最大周长收缩的因素依次为:温度、风速和湿度;温度、风速和湿度对槟榔干果硬度和咀嚼性有显著影响。对干燥工艺条件进行正交实验,最终确定其工艺条件为温度55℃、风速1.2 m/s和湿度60%RH,在此条件下槟榔干果硬度和咀嚼性最低,减少了食用者在咀嚼槟榔时槟榔纤维对口腔的伤害同时也提升了口感。

在最优干燥工艺条件下进行烟熏优化,通过减少烟熏时间从而减少有害物质的附着。优化烟熏后槟榔干果有害物质残留量均符合相关标准,尤其是极大的降低了苯并(α)芘和甲醛含量,提高了槟榔安

度增加。这可能由于琥珀酰化过程中蛋白质侧链展开,使更多的亮氨酸暴露出来,因此在347 nm处最大吸收峰增大,荧光强度增强。经琥珀酰化改性后,肽链伸展,空间结构发生变化,分子柔韧性提高,使得其溶解性大大提高。

### 3 结论

采用琥珀酰化法对燕麦分离蛋白进行改性,利用响应面法优化得到琥珀酰化OPI优化工艺条件为:反应温度50℃、pH8.5、琥珀酸酐添加量10%、蛋白浓度4%。该条件下制备的琥珀酰化OPI的溶解度为68.38%,预测值与实验值之间的良好拟合性证实了模型的有效性,说明利用本实验建立的模型的优化结果与实际情况吻合。琥珀酰化后OPI的荧光强度增强,可能是改性后侧链结构展开,更多的亮氨酸暴露出来引起的。经琥珀酰化改性后,肽链伸展,空间结构发生变化,分子柔韧性提高,使得其溶解性大大提高,为以后功能性质的深入研究及应用奠定了良好的基础。

### 参考文献

- [1] 管晓,姚惠源,张鸣镝. 燕麦麸分离蛋白的酶解对其功能性质的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 217-221.
- [2] 李进. 燕麦的营养价值与保健功效[J]. 新疆农业科技, 1993(5): 38-39.
- [3] 李芳,刘刚,刘英. 燕麦的综合开发和利用[J]. 武汉工业大学学报, 2007, 26(1): 23-26.
- [4] 张红印,朱加进. 小麦面筋蛋白琥珀酰化改性研究[J]. 中国农业科学, 2003, 36(3): 313-317.
- [5] 姜绍通,唐文婷,潘丽军. 小麦面筋蛋白琥珀酰化修饰研究[J]. 食品科学, 2005, 26(12): 40-44.
- [6] 熊正俊,赵国华. 酰化对大豆蛋白结构和功能性质影响[J].

粮油与油脂, 2001, 9: 5-7.

- [7] Gruener L, Ismond M A H. Effects of acetylation and succinylation on the functional properties of the canola 12S globulin[J]. Food Chemistry, 1997, 60: 513-520.
- [8] Dua S, Mahajan A. Improvement of functional properties of rapeseed(*Brassica campestris* Var.Toris) preparations by chemical modification[J]. J Agriculture and Food Chemistry, 1996, 44: 706-710.
- [9] Wanasundara, Shahidi F. Functional properties of acylated flax protein isolates[J]. J Agriculture and Food Chemistry, 1997, 45: 2431-2441.
- [10] Lelia M, Mahdi K, Mohammad S. Effect of succinylation and deamidation on functional properties of oat protein isolate[J]. Food Chemistry, 2009, 114: 127-131.
- [11] Lawal O S, Adebowale K O. Effect of acetylation and succinylation on solubility profile, water absorption capacity, oil absorption capacity and emulsifying properties of mucuna bean (*Mucuna pruriens*) protein concentrate[J]. Nahrung/Food, 2004, 48(2): 129-136.
- [12] 姚玉静, 杨晓泉. 乙酰化大豆分离蛋白的功能特性研究[J]. 中国调味品, 2001(9): 16-19.
- [13] 姚玉静, 杨晓泉, 唐传核, 等. 酰化对大豆分离蛋白水合性质的影响[J]. 食品与机械, 2005, 22(4): 19-21.
- [14] María J S, María J M, Ana M R P. Influence of Maillard conjugation on structural characteristics and rheological properties of whey protein dextran systems[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 39: 223-230.
- [15] Broersen K, Voragen A G J, Hamer R J, et al. Glucoforms of  $\beta$ -lactoglobulin with improved thermostability and preserved structural packing[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2004, 86: 78-87.

(上接第293页)

全品质,质构结果显示,减少烟熏时长能降低槟榔硬度和咀嚼性,提高槟榔食用品质。

### 参考文献

- [1] 许丹. 食用槟榔的安全风险分析[D]. 长沙:中南林业科技大学, 2012: 1-3.
- [2] 王友水,蒋小平,刘亮. 食用槟榔的研究进展[J]. 实用预防医学, 2007, 14(3): 942-944.
- [3] 严聘,李彦. 食用槟榔的加工工艺研究[J]. 食品与机械, 2003(6): 34-35.
- [4] 谢龙莲,张慧坚,方佳. 我国槟榔加工研究进展[J]. 广东农业科学, 2011, 4(1): 96-98.
- [5] 黄丽云,刘立云,李艳,等. 海南主栽槟榔品种鲜果性状评价[J]. 热带作物学报, 2014, 35(2): 313-316.
- [6] 娄正,刘清,郭晶,师建芳,等. 槟榔预处理及热风干燥工艺条件优化[J]. 食品科学, 2014, 35(16): 46-51.
- [7] 张容鹄,袁志浩. 海南槟榔初加工状况调研分析[J]. 农业开发与装备, 2014(12): 41-42.
- [8] 张可喜,符新,王祝年,等. 槟榔热风干燥工艺的研究[J]. 热

带农业工程, 2006(1): 20-23.

- [9] Maria Dolores Alvarez. Influence of deformation rate and degree of compression on textural parameters of potato and apple tissues in texture profile analysis[J]. Europe Food Research Technology, 2002, 215: 13-20.
- [10] GB/T 5009.3-2003食品中水分的测定[S].
- [11] GB/T 5009.27-2003食品中苯并芘的测定[S].
- [12] NY/T1435-2007水果、蔬菜及其制品中二氧化硫总量的测定[S].
- [13] NY5172-2002无公害食品水发水产品[S].
- [14] GB5009.12-2010食品中铅的测定[S].
- [15] 王广峰. 苯并芘对人体的危害和食品中苯并芘的来源及防控[J]. 菏泽学院学报, 2014, 36(2): 66-70.
- [16] 杨智海,宋莉,乔蓉霞,等. 中药外源性有害残留物二氧化硫的研究进展[J]. 药物分析杂志, 2010, 30(11): 2246-2250.
- [17] 史巧巧,席俊,陆启玉. 食品中苯并芘的研究进展[J]. 食品工业科技, 2014, 35(5): 279-386.
- [18] 康效宁,吉建邦,李梁. 槟榔烘制工艺中不安全因子分析[J]. 食品与机械, 2015, 31(1): 68-70.