

热泵干燥槟榔中试工艺参数优化

张容鹄¹, 高元能², 冯建成³, 谢辉¹, 邓浩¹, 庄光辉¹, 窦志浩^{1*}

(1. 海南省农业科学院农产品加工设计研究所, 海口 571100;

2. 海南泉能能源有限公司, 万宁 571500; 3. 海南大学材料与化工学院, 海口 570228)

摘要: 为了探索新型节能、低碳排放的槟榔干燥技术, 应用热泵干燥设备对槟榔进行干燥研究, 获得热泵干燥中试工艺参数。单因素试验分析了煮沸时间对槟榔硬度的影响, 干燥温度和装载量对槟榔水分的影响; 采用正交试验, 通过加权评分值计算方法评价干果品质, 优化热泵干燥工艺参数; 测定储藏 30 d 后的干果进行理化和微生物指标; 比较热泵干燥、蒸汽干燥和传统干燥槟榔的成本及品质。结果表明, 新鲜槟榔经过沸水煮沸 15 min, 前 12 h 内干燥温度为 50℃、12 h 后干燥温度为 65℃、装料量为 3.5 t、烘房空气相对湿度为 25% 时, 槟榔含水率为 16.8%, 好果率为 96.0%, 均匀度为 91%, 单位质量干果耗电量为 0.92 (kW·h)/kg, 所干燥的槟榔干果综合评分为 90.1 分, 呈橄榄黄或褐色。25℃ 储藏 30 d 无霉腐现象, 检测结果显示含水率为 17.8%, 未检测出汞和苯并芘, 铅和砷质量分数分别为 0.02 和 0.1 mg/kg, 致病菌未检出, 大肠菌群数 < 30 cfu/g, 霉菌计数为 30 cfu/g。经比较, 热泵干燥槟榔比蒸汽干燥成本低 11%, 比传统土炉干燥成本低 50%, 零排放、无污染、操作智能化。研究结果为槟榔热泵干燥的标准化生产提供技术参考。

关键词: 干燥; 工艺; 优化; 热泵; 槟榔; 加权评分法

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.09.034

中图分类号: TS201.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-09-0241-07

张容鹄, 高元能, 冯建成, 谢辉, 邓浩, 庄光辉, 窦志浩. 热泵干燥槟榔中试工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 241—247. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.09.034 <http://www.tcsae.org>

Zhang Ronghu, Gao Yuanneng, Feng Jiancheng, Xie Hui, Deng Hao, Zhuang Guanghui, Dou Zhihao. Technologic parameter optimization in pilot-scale process of heat pump drying of *Areca catechu* L.[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(9): 241—247. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.09.034 <http://www.tcsae.org>

0 引言

槟榔 (*Areca catechu* L.) 属棕榈科多年生常绿乔木, 具有很高的药用价值, 被列为四大南药 (槟榔、砂仁、益智、巴戟) 之首^[1-3]。槟榔除鲜食外, 90% 以上鲜果需干燥成干果, 以备进一步深加工。海南省年产槟榔干果约 20 万 t, 年产值已超百亿^[4], 槟榔干燥加工业已成为海南当地重要的支柱产业。槟榔干燥可采用热风干燥法^[5-6]和真空冷冻干燥法^[7], 但试验条件和设备设施的严苛限制其在生产上推广应用。目前加工生产中槟榔干燥主要采用传统土炉干燥、蒸汽干燥和热泵干燥等 3 种方法^[8]。土炉干燥法属作坊式加工, 规模小、劳动强度大、污染严重, 难以适应现代农业的发展。蒸汽干燥法以燃烧煤炭释放的热能为热源, 规模化程度大、适于集约化农产品加工, 但大量温室气体的排放, 致其应用受限。而热泵干燥槟榔因其节能环保的优势凸显了良好的市场前景, 日益成为槟榔干燥加工的首选方法。

热泵干燥较之于热风干燥可节能 30%~50%^[9], 在热水供应及农产品干燥应用方面发挥了积极的作用^[10]。热泵干燥的形式有空气源热泵干燥、化学源热泵干燥、地源热泵干燥和太阳能热泵干燥等^[11]。国外应用热泵干燥技术已在可可豆^[12]、姜酚^[13]、辣椒^[14]和苹果^[15]等农产品干燥上获得了稳定的工艺参数。中国在农产品干燥研究方面以空气源热泵法最多^[16], 主要用于干燥龙眼^[17]、黄花菜^[18]和西洋菜^[19]等, 而有关空气源热泵干燥槟榔的工艺参数优化国内外还未见报道。空气源热泵干燥槟榔是在传统土炉干燥基础上的技术改进和突破, 具有节能、省工、智能化、无污染的优势^[20]。本试验采用单因素法和多因素正交试验, 优化空气源热泵干燥槟榔中试水平上的工艺参数, 并进行大规模干燥试验, 以期获取稳定的空气源热泵干燥槟榔中试工艺, 为槟榔热泵干燥加工业的标准化和产业化提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 热泵干燥装置及工作原理

槟榔热泵干燥示意图如图 1 所示。空气源热泵干燥的原理是利用热泵蒸发器吸收外界空气中的热量, 经过压缩机做功, 将热量转移到烘干房中, 烘干房中的空气经过循环加热, 将物料中的水分不断蒸发并吸收, 再经过排湿风机排到烘房外, 从而带走物料中的水分, 最终实现物料的连续干燥。

收稿日期: 2015-12-31 修订日期: 2016-03-23

基金项目: 海南省产学研一体化专项资金 (CX20140024); 海南省重点研发项目 (ZDYF2016099)

作者简介: 张容鹄, 女, 湖北天门人, 副研究员, 研究方向为农产品加工与贮藏。海口 海南省农业科学院农产品加工设计研究所, 571100。

Email: zrh0912@126.com

*通信作者: 窦志浩, 男, 广东吴川人, 研究员, 研究方向为农产品加工及贮藏。海口 海南省农业科学院农产品加工设计研究所, 571100。

Email: 513408658@qq.com

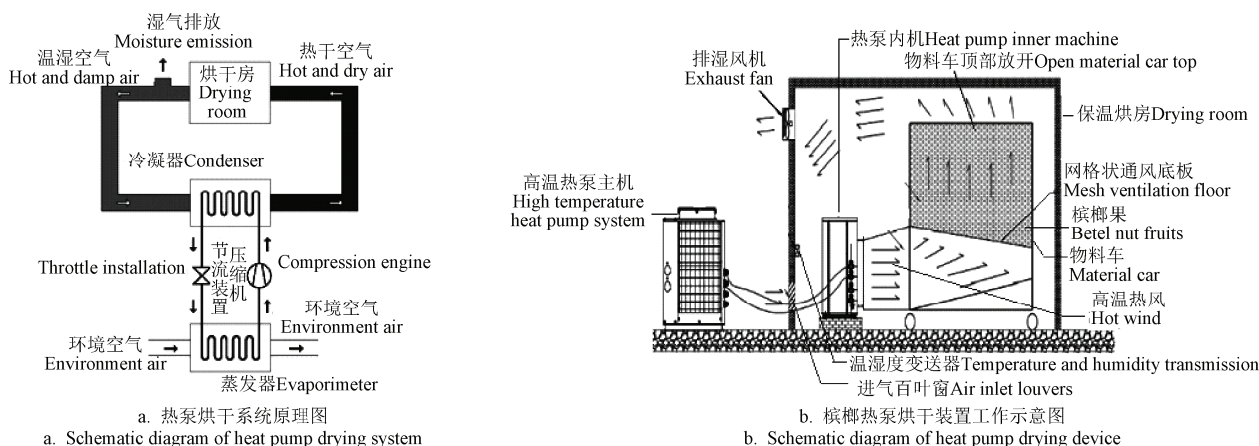


图1 热泵干燥槟榔试验台原理图

Fig.1 Schematic diagram of heat pump drying test rig of betel nut

热泵烘干机由海南泉能能源有限公司提供, 烘房长×宽×高分别是 3.6 m×2.5 m×2.4 m, 最大装载量为 3.6 t, 主要参数: 温度为 35~80℃, 风速为 2.0 m/s, 相对湿度(RH, relative humidity) 为 10%~90%。

1.2 材料与仪器

新鲜槟榔产自海南省万宁市, 采摘后, 去掉无果蒂或发黄发黑的槟榔果, 选取大小、色泽一致、湿基含水率为 80%±0.8%的鲜果为试验材料。

XMTA-6000 型数显鼓风干燥箱, 上海叶拓仪器仪表有限公司; TMS-PRO 质构分析仪, 美国 FTC 公司; 蒸汽烘干房, 万宁海联槟榔合作社。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 质构测定

质构测定采用质地多面分析法(texture profile analysis, TPA)测定硬度, 模拟牙齿的咀嚼状态, 把煮沸处理的槟榔果横放在载物台中央, 对槟榔全果进行 2 次挤压。TPA 试验参数如下: 测前速率 0.5 mm/s, 测试速率 0.5 mm/s, 测后速率 0.5 mm/s; 形变量: 50%; 停顿时间: 3 s; 得到相关质构参数, 每次取 10 个样品, 以硬度 1 为参考指标, 去掉最低和最高硬度值, 取平均值, 测定结果用 N 表示。

1.3.2 果蒂脱落率

取 4 kg 煮沸处理的槟榔果沥干, 槟榔果的总数计值为 N_m , 网筛振摇 4~5 次, 拣出脱蒂的槟榔并计数, 计值 N_i , 果蒂脱落率为 P (%)。

$$P = \left(\frac{N_i}{N_m} \right) \times 100\% \quad (1)$$

1.3.3 耗电量

耗电量以干燥得到 1 kg 槟榔干果耗电度数计算。

1.3.4 含水率测定

参考 GB/T 5009.3-2010 食品安全国家标准 食品中水分的测定方法。每次取果进行含水率测量时, 扒开顶层果, 在 4 个角落和中间五个点各取 5 个果, 切碎后混合取样进行水分测定。

1.3.5 槟榔干果好果率

由训练有素的技术工人选果。干果最大横径为 15~

21 mm、纵径(果蒂到果底的长度)为 45~64 mm, 纹理清晰的果, 为好果, 称其质量为 M_i (kg); 否则即为坏果, 称其质量为 M_m (kg), 好果率为 R (%)。

$$R = \left(\frac{M_i}{M_i + M_m} \right) \times 100\% \quad (2)$$

1.3.6 槟榔干果均匀度

参考 DB 469006/T 07-2012 槟榔干果标准, 随机抽取样果 60 个, 以目测法分拣出最大和最小的干果各 20 个, 称重。计算小果质量 G_i (kg) 与大果质量 G_m (kg) 的比值, 以均匀度 E (%)表示。

$$E = \left(\frac{G_i}{G_m} \right) \times 100\% \quad (3)$$

1.3.7 综合评分

参考李敏^[21]加权评分值计算方法, 综合考虑单位质量耗电量、干果含水率、好果率和均匀度等, 对干果品质进行加权评分。采用专家赋权法确定各指标的权重, 以满分 100 分计, 好果率和均匀度占权重分值均为 30 分, 单位质量干果耗电量和含水率权重分值均为 20 分。好果率和均匀度以 A_i 计算加权得分, 含水率和耗电量以 B_i 计算加权得分。其中, 耗电量的多少与烘房外空气的温度以及装载量密切相关, 在本试验中以单位质量耗电量 0.8 (kW·h)/kg 为最佳耗电量。含水率与干果的品质和干燥成本相关, 本试验以 14%为最佳含水率。好果率以 100%为最佳。DB 469006/T 07-2012 槟榔干果标准规定果实均匀指数以 0.9 为优品果, 本试验均匀度以 100%为最佳。

$$A_i = a \cdot \left(\frac{K_i}{K_m} \right), \quad (4)$$

$$B_i = a \cdot \left(1 - \frac{|K_m - K_i|}{K_i} \right). \quad (5)$$

式中 a 为权重分值; K_m 为该指标所对应最佳试验结果; K_i 为该指标所对应实际试验结果; 综合评分为各指标加权得分之和。

1.4 试验方法

1.4.1 试验方案工艺流程

新鲜槟榔→挑选→煮沸（100℃）→50℃干燥 12 h→优化温度干燥→选果→优化温度干燥→选果→成品。

1.4.2 蒸煮时间确定

新鲜槟榔分别经沸水蒸煮 0、5、10、15、20、25、30、35 和 40 min 后，分别测定其硬度和果蒂脱落率。

1.4.3 干燥温度和干燥时间的确定

新鲜槟榔经过沸水蒸煮 20 min，沥干，装料量 2.7 t，干燥 12 h 内温度设置为 50℃，热泵烘房内 RH 为 40%；干燥 12 h 后分别在 50、55、60、65 和 70℃的条件下进行，热泵烘房 RH 为 25%。每 7 h 用直接干燥法测定一次物料的含水率，平行测 3~5 次，取平均值。所测槟榔含水率为 18%±2%时，停止干燥，记录干燥的时间。

1.4.4 烘房装载量试验

干燥 12 h 内温度设置为 50℃，热泵烘房内空气 RH 为 40%；干燥 12 h 后热泵干燥温度设置为 65℃，热泵烘房内空气 RH 为 25%，装料量分别为 2.70、3.15、3.60 和 4.05 t，干燥时间不定，随时监测含水率，当含水率降至 18%±2%时，停止干燥，测定其好果率、均匀度。

1.4.5 正交试验

干燥 12 h 内温度设置为 50℃，热泵烘房内空气 RH 为 40%；干燥 12 h 后，热泵烘房内空气 RH 为 25%，选择蒸煮时间、干燥温度、干燥时间和装载量 4 个因素进行正交试验设计，每个因素取 3 个水平，采用加权评分法，以好果率、均匀度、含水率和单位质量耗电量的综合评分作为评价指标，确定热泵干燥的最佳工艺。正交试验设计采用 L(3⁴)正交表，因素水平见表 1。

表 1 正交试验因素水平表 L ₉ (3 ⁴)				
Table 1 Factors and levels of orthogonal experiment L ₉ (3 ⁴)				
水平 Level	干燥温度 Dry temperature A/℃	煮沸时间 Cooking time B/min	装载量 Loading capacity C/t	干燥时间 Drying time D/h
1	55	10	2.7	84
2	60	15	3.1	96
3	65	20	3.5	108

1.4.6 干果质量检测

按照优化的工艺干燥槟榔，25℃贮藏 30 d 后，取样送中国热带农业科学院农产品检测中心，对槟榔干果含水率、汞、铅、砷、苯并芘、大肠菌群、霉菌和致病菌等进行检测。

1.4.7 不同干燥方式比较

采用热泵干燥优化工艺干燥槟榔，与传统土炉干燥法和蒸汽干燥法进行比较，干燥时间均为 96 h，对比干果品质、含水率、能耗及务工费等。

土炉干燥方法^[8]：取槟榔鲜果 3.5 t，煮沸 15 min，装于 14 个土炉中，每个土炉装 0.25 t，按照传统干燥方法进行干燥。蒸汽干燥方法^[8]：取槟榔鲜果 3.5 t，煮沸 15 min，装于蒸汽烘房中，温度设置为 65℃，进行干燥。

1.5 数据处理方法

采用 Origin8.0 作图，采用 SPSS Statistics 18 对试验结果进行参数优化及统计分析，显著性水平（P<0.05）。试验重复 3~5 次，结果以平均值±标准差表示。

2 结果与分析

2.1 煮沸时间对槟榔果硬度的影响

槟榔煮沸又称为杀青、漂烫。槟榔经过煮沸后有 3 个作用，一是溶解去除槟榔表皮的果蜡，使水分更容易溢出，二是破坏组织结构，使槟榔软化疏松，三是除涩味。适当的蒸煮时间可以起到软化杀青的作用，蒸煮时间长，果蒂容易脱落，影响槟榔干燥时纹路的收缩。煮沸时间对硬度的影响结果见图 2，随着煮沸时间的延长，槟榔的硬度逐渐降低，后趋于稳定。槟榔鲜果煮沸时间为 10 min 内，其硬度迅速降低，从 514 N 降到 358 N；煮沸 20 min，硬度为 325 N；后随煮沸时间增加，硬度变化趋于平缓。煮沸 25 min 后硬度几乎无变化，说明煮沸时间最好控制在 10~25 min。槟榔果蒂脱落对槟榔干燥极为不利，影响干果纹路的收缩及后期深加工风味的呈现，因此在整个干燥过程中应尽量避免果蒂的脱落。图 3 是煮沸时间对果蒂脱落率的影响，煮沸时间越长，果蒂脱落率逐步增加。煮沸 10 min 果蒂脱落率为 1%；煮沸 20 min，果蒂脱落率为 2%；煮沸 25 min，果蒂脱落率为 4%；而煮沸 40 min 时，果蒂脱落率上升到 8%。综合图 2 和图 3，为使煮沸后的槟榔硬度小同时果蒂脱落率低，因此，煮沸时间以 15 min 为宜。

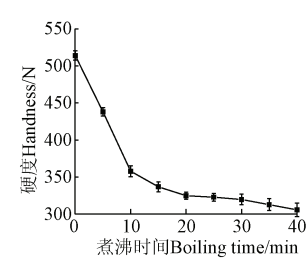


图 2 煮沸时间对槟榔硬度的影响

Fig.2 Effects of boiling time on hardness of pedicel

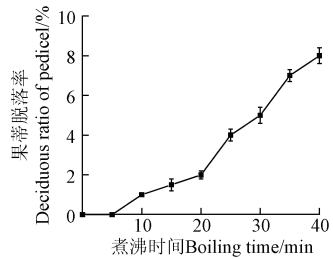


图 3 煮沸时间对槟榔果蒂脱落率的影响

Fig.3 Effects of boiling time on deciduous ratio of pedicel

2.2 干燥温度及干燥时间对槟榔干燥效果的影响

干燥温度不同，槟榔干果含水率下降的幅度有明显差异（图 4）。从图 4 可以看出，在干燥 20 h 之内，槟榔含水率变化小，这与热泵的升温过程缓慢有关。干燥 77 h 后，当干燥温度为 70℃时，湿基含水率达 15.89%，而干燥温度为 50℃时，湿基含水率为 46.1%，而要达到相同的湿基含水率 15.89%，干燥时间要延长到 120 h 以上。李梁^[22]等研究了含水率对槟榔干果质地的影响发现，在食用槟榔的深加工中，含水率为 18%的槟榔干果口感绵软，对口腔刺激较小。因此，槟榔含水率达 18%±2%时，应停止干燥。热泵干燥中，干燥温度越低，干燥时间就越长，能耗高；干燥温度越高，干燥时间短，便于生产，但热泵负荷太大，工作不稳定，且夜间空气温度

降低时,烘干房温度难以达到 70℃。故干燥温度以 60~65℃,干燥时间以 90 h 为宜。姜正等^[5]研究表明槟榔的热风干燥没有恒速干燥阶段,只有降速干燥阶段。干燥温度对槟榔的干燥有显著影响,且干燥速率随着干燥温度的升高而增大。这与本试验研究的结果一致。推测原因可能是槟榔进行热泵干燥时,温度设置低,排热频繁,水分蒸发慢,干燥时间长;而温度设置高,热量损失少,水分蒸发快,干燥时间明显缩短。

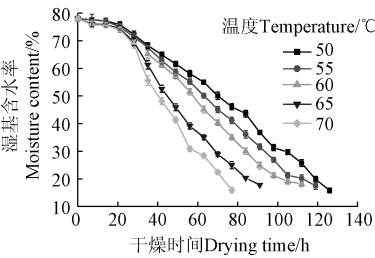


图 4 槟榔在不同干燥温度和干燥时间的含水率
Fig.4 Moisture content of different temperature and time of betel nut

2.3 槟榔果装载量对干燥效果的影响

从表 2 可以看出装载量为 2.70 t 时,单位质量耗电数为 0.95 (kW·h)/kg;装载量 3.15 t 时,单位质量耗电数为 0.87 (kW·h)/kg,装载量为 4.05 t 时,单位质量耗电数为 1.02 (kW·h)/kg,耗电量差异明显 ($P<0.01$),说明槟榔果装载量大小直接影响干燥的能耗。不同装载量进行干燥,随着干燥时间变化,其好果率和含水率也有所差异,装载量为 2.70 t,干燥时间为 84 h,干果含水率为 17.44%,好果率为 94.9%;装载量为 3.15 t,干燥时间为 84 h,干果含水率为 18.05%,好果率为 96.1%;装载量为 3.60 t,干燥时间为 91 h,干果含水率为 18.54%,好果率为 96.5%。推测原因可能是由于装载量增加,堆砌厚度高,挤压力量大,致使槟榔干果纹路收缩紧密的缘故,从而增加好果率;装载量为 4.05 t 时,超过了最高设计装载量,干燥时间明显延长达 120 h,含水率为 22.62%,湿果偏多,好果率为 91.6%,在 4 个装载量中最低,干燥时间长对生产周转和降低成本都极为不利。综上,装载量在 2.70~3.60 t 范围内,干燥时间在 91 h 内,可满足生产需要,所得干果含水率适中,耗电量适宜,好果率高。

表 2 烘房不同装载量下干燥效果
Table 2 Drying effects of different loading capacity

序号 No.	装载量 Loading /t	干燥时间 Drying time/h	单位质量耗电数 Power consumption of dried fruit/ (kW·h)·kg ⁻¹	好果率 Ratio of good dried fruit/%	含水率 Moisture content/%
1	2.7	84	0.95±0.09	94.9±2.3	17.44±1.2
2	3.15	84	0.87±0.08	96.1±1.8	18.05±0.8
3	3.6	91	0.93±0.09	96.5±1.2	18.54±1.0
4	4.05	120	1.02±0.07	91.6±2.4	22.62±1.1

注:煮沸时间 15 min,前 12 h 干燥温度为 50℃,12 h 后温度为 65℃。
Note: Boiling time 15 min, dry temperature was 50℃ before 12 h, dry temperature was 65℃ after 12 h.

2.4 正交试验优化

表 3 为正交试验结果,由表 3 可知,最佳组合条件为 A₃B₂C₃D₂,即干燥温度为 65℃,煮沸时间为 15 min、装载量为 3.5 t,干燥时间为 96 h。表 4 为正交试验方差分析结果。由表 4 可知,影响综合评分的主次因素依次是干燥温度>煮沸时间>干燥时间>装载量,4 个因素都对评分结果有显著影响。经验证,按照最优条件进行热泵干燥,槟榔单位质量含水率为 16.80%,好果率为 96.0%,干果均匀度为 91.0%,单位质量耗电量为 0.92 (kW·h)/kg,综合评分为 90.1 分。

表 3 正交试验设计及结果
Table 3 Orthogonal experimental design and result

序号 No.	干燥温度 Dry temperature A	煮沸时间 Cooking time B	装载量 Loading capacity C	干燥时间 Drying time D	综合评分 Comprehensive score
1	1	1	1	1	65.7±2.1
2	1	2	2	2	80.6±2.3
3	1	3	3	3	70.3±1.4
4	2	1	2	3	82.6±1.1
5	2	2	3	1	83.4±0.8
6	2	3	1	2	79.7±1.9
7	3	1	3	2	89.2±1.7
8	3	2	1	3	87.6±1.4
9	3	3	2	1	75.7±2.3
K ₁	216.6	237.5	238.3	224.8	
K ₂	245.7	251.6	238.9	249.5	
K ₃	252.5	225.7	242.9	240.5	
极差 R	35.9	25.9	4.6	24.7	
较优水平	A ₃	B ₂	C ₃	D ₂	

表 4 正交试验结果方差分析
Table 4 Variance analysis of orthogonal test results

差异来源 Source	离均差平方和 Sum of squares	自由度 df	均方差 Mean square	F 值 F values	显著性 Sig.
校正模型 Corrected model	1 426.507a	8	178.31	58.96	0
截距 Intercept	170 360.67	1	170 360.67	56 334.82	0
干燥温度 Dry temperature	729.68	2	364.84	120.65	0
煮沸时间 Cooking time	334.56	2	167.28	55.32	0
装载量 Loading capacity	48.69	2	24.34	8.05	0.003
干燥时间 Drying time	313.58	2	156.79	51.85	0
误差 Error	54.43	18	3.024		
总计 Total	171 841.61	27			
校正总计 Total of Correct	1 480.94	26			
R ² =0.963		R ² adjust =0.947			

2.5 槟榔干果检测结果

按照优化条件干燥的槟榔干果 25℃下储藏 30 d，感官检测为无霉变，颜色橄榄色或褐色，分析检测结果如表 5，按照槟榔深加工企业要求，含水率在 20%以下均合格，贮藏 30 d 后测得干果含水率为 17.8%，在合格范围内。按照 GB 2762-2012 食品安全国家标准 食品中污染物限量，由表 5 可以看出槟榔干果不含汞和苯并芘，铅和砷含量均在指标范围内。按照 GB16325-2005 干果食品卫生标准，致病菌没有检出。按照中国食品微生物限量规定大肠菌群数合格，霉菌计数是按照 GB 478915-2010 食品安全国家标准，食品微生物学检验霉菌和酵母计数结果，实测值为 30 cfu/g，小于 100 cfu/g。

表 5 槟榔干果检测结果表
Table 5 Test results of dried betel nuts

检测指标 Indexes of test	指标范围 Index ranges	实测值 Measured value	结论 Conclusion
含水率 Moisture content/%	≤20	17.8	合格
Hg/(mg·kg ⁻¹)	≤0.01	-	合格
Pb/(mg·kg ⁻¹)	≤0.2	0.02	合格
As/(mg·kg ⁻¹)	≤0.5	0.1	合格
苯并芘 Benzopyrene/(μg·kg ⁻¹)	≤5	-	合格
大肠菌群数 Number of coliform group/ (cfu·g ⁻¹)	≤30	<30	合格
致病菌 Pathogenic bacteria	-	-	合格
霉菌计数 Mould count/(cfu·g ⁻¹)	≤100	30	合格

注：“-”表示未检出。
Note:“-” Means the index was undetected.

2.6 不同干燥方式比较

表 6 是槟榔采用热泵干燥、蒸汽干燥和传统土炉干燥 3 种方式得到干果的成本、能耗、干果品质分析表。耗电成本为 0.90 元/(kW·h)，煤炭为 0.7 元/kg。由表 6 可知，热泵干燥过程中只耗电，零排放，无污染；蒸汽干燥是通过燃烧煤来输送热量，因此伴有大量的 CO₂、硫化物等排放；土炉是通过燃烧蜂窝煤，也产生一定的 CO₂、硫化物等污染物，其排放量小于蒸汽干燥炉的排放量。热泵干燥和蒸汽干燥因为实现了机械化操作，均比土炉干燥节省人工，降低了劳动强度。生产 1 kg 干果耗电费用，热泵干燥为 0.83 元，蒸汽干燥为 0.05 元；热泵干燥、蒸汽干燥和土炉干燥三者的电费、煤费和人工费总费用成本分别是 1.83、2.04 和 3.61 元，热泵干燥成本最低，比蒸汽干燥成本低 11%，比传统干燥方式成本低 50%。而热泵干燥的好果率、均匀度与蒸汽干燥相比无明显差异（ $P>0.05$ ），但均高于土炉干燥方式（ $P<0.05$ ）。热泵干燥的干果含水率为 16.8%，明显低于蒸汽干燥和土炉干燥的干果含水率，主要原因是热泵干燥可以控制干燥房的相对湿度，有利于水分的快速排出。蒸汽干燥和土炉干燥不能控制空气的相对湿度，因此水分蒸发和排出减慢，因而干果含水率高，干果要达到热泵烘干相同的含水率，需要进一步延长干燥时间。

表 6 不同干燥方式比较
Table 6 Comparison of different drying ways

比较指标 Comparative index	热泵干燥 Heat pump drying	蒸汽干燥 Steam drying	土炉干燥 Furnace drying
每千克干果耗电费 Power cost per kg dried fruit/元	0.83	0.05	0
每千克干果耗煤费 Coal cost per kg dried fruit/元	0	0.81	1.68
每千克干果耗人工费 Labour cost per kg dried fruit/元	1.00	1.18	1.93
费用总计 Total cost/元	1.83	2.04	3.61
好果率 Ratio of good fruit/%	96.0	95.6	94.2
均匀度 Uniformity/%	91.0	91.2	89.5
含水率 Moisture content/%	16.8	18.1	20.4
污染排放 Pollution emission/m ³	0	8~10	4~6

3 结 论

1) 槟榔干燥前煮沸杀青，利于后续干燥，干燥过程果蒂应尽量保持完整，不能脱落。煮沸时间短于 10 min，达不到软化的目的，煮沸时间太长（长于 20 min），果蒂脱落率明显增加，因此煮沸时间以 15 min 为宜。

2) 采用热泵干燥工艺，通过单因素法及多因素正交试验的优化，得到了槟榔热泵干燥的最佳工艺，即：新鲜槟榔经过沸水蒸煮 15 min，前 12 h 内干燥温度为 50℃，热泵烘房空气相对湿度为 40%，12 h 后干燥温度为 65℃、装料量为 3.5 t、热泵空气相对湿度为 25%时，干燥的槟榔干果含水率为 16.8%，好果率为 96.0%，均匀度为 91.0%，耗电量为 0.92 (kW·h)/kg。

3) 生产的槟榔干果感官品质良好，呈橄榄黄或褐色，25℃下储藏 30 d 干果无霉腐现象出现，有槟榔固有的滋味，含水率 17.8%。

4) 热泵干燥技术适用于槟榔干燥，具有节能、零排放、干燥成本低和干果品质好等优势。热泵干燥比蒸汽干燥节约成本低 11%，比传统土炉干燥节约成本低 50%，热泵干燥好果率和均匀度与蒸汽干燥好果率无明显差异（ $P>0.05$ ），但均高于传统土炉干燥好果率（ $P<0.05$ ）。

[参 考 文 献]

[1] 王丹, 庞玉新, 胡璇, 等. 海南省槟榔种植业发展现状及其动力分析[J]. 广东农业科学, 2013(15): 207—209.
Wang Dan, Pang Yuxin, Hu Xuan, et al. Development and motivation analysis of areca planting industry in Hainan province[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2013(15): 207—209. (in Chinese with English abstract)

[2] 张俊清, 符乃光, 赖伟勇, 等. 海南槟榔等 4 种南药农残含量现状研究[J]. 中国药理学杂志, 2005, 40(6): 460—462.
Zhang Junqing, Fu Naiguang, Lai Weiyong, et al. Study on the content of organochlorine pesticide residue of Areca catechu, Alpinia oxyphylla, Myristica fragrans and Eugenia caryophyllata[J]. Chin Parm J, 2005, 40(6): 460—462. (in Chinese with English abstract)

[3] 萧福元, 袁晟, 桂卓嘉, 等. 湖南地区食用槟榔流行病学研究[J]. 实用预防医学, 2011, 18(7): 1218—1222.
Xiao Fuyuan, Yuan Sheng, Gui Zhuojia, et al.

- Epidemiological study of edible betel nut in hunan[J]. Practical Preventive Medicine, 2011, 18(7): 1218—1222. (in Chinese with English abstract)
- [4] 许丹, 刘芳串, 申衍豪, 等. 食用槟榔加工的安全风险评估研究进展[J]. 食品工业科技, 2012(5): 388—390.
Xu Dan, Liu Fang, Shen Yanhao, et al. Research progress in the safety and risk assessment of edible betel nut processing[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012(5): 388—390. (in Chinese with English abstract)
- [5] 娄正, 刘清, 郭晶, 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.
Lou Zheng, Liu Qing, Guo Jing, et al. Pretreatment and hot air drying of betel nuts[J]. Food Science, 2014, 35(16): 46—51. (in Chinese with English abstract)
- [6] 黄文芳, 陈立军, 叶利春, 等. 正交试验法优化槟榔鞣质的干燥工艺[J]. 中药材, 2015, 38(6): 1309—1311.
Huang Wenfang, Chen Lijun, Ye Lichun, et al. Optimization of drying process on tannins of betelnut by orthogonal test[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2015, 38(6): 1309—1311. (in Chinese with English abstract)
- [7] 高红日, 周东霞, 何宗奇, 等. 槟榔果真空冷冻干燥工艺初探[J]. 保鲜与加工, 2015, 15(4): 50—54.
Gao Hongri, Zhou Dongxia, He Zongqi, et al. Preliminary study on the vacuum freeze-drying processing of areca nut[J]. Storage and Process, 2015, 15(4): 50—54. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张容鹄, 窦志浩. 海南槟榔初加工状况调研分析[J]. 农业开发与装备, 2014(12): 41—43.
Zhang Ronghu, Dou Zhihao. Survey and analysis on primary process Situation of betel nut in Hainan[J]. Agricultural Development and Equipment, 2014(12): 41—43. (in Chinese with English abstract)
- [9] Neslihan Colaka, Arif Hepbaslib. A review of heat pump drying: Part 1-Systems, models and studies[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(9): 2180—2186.
- [10] Patel K K, Kar A. Heat pump assisted drying of agricultural produce-an overview[J]. J Food Sci Technol, 2012, 49(2): 142—160.
- [11] 夏源, 金磊, 刘腾, 等. 热泵技术应用于果蔬干燥的研究进展[J]. 农业科学研究, 2014, 35(1): 60—67.
Xia Yuan, Jin Lei, Liu Teng, et al. A review of heat pump assisted drying of fruits and vegetables[J]. Journal of Agricultural Sciences, 2014, 35(1): 60—67.
- [12] Hii C L, Law C L, Suzannah S. Drying kinetics of the individual layer of cocoa beans during heat pump drying[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 108(2): 276—282.
- [13] Hawlader M N A, Perera C O, Tian M. Comparison of the retention of 6-gingerol in drying under modified atmosphere heat pump drying and other drying methods[J]. Dry Technol 2006, 24(1): 51—56.
- [14] Artnaseaw A, Theerakulpisut S, Benjapiyaporn C. Drying characteristics of Shiitake mushroom and Jinda chili during vacuum heat pump drying[J]. Food Bioprod Process, 2010, 88(2): 105—114.
- [15] Aktas M, Ceylan I, Yilmaz S. Determination of drying characteristics of apples in a heat pump and solar dryer[J]. Desalination, 2009, 239(13): 266—275.
- [16] 赵宗彬, 朱斌祥, 李金荣, 等. 空气源热泵干燥技术的研究现状与发展展望[J]. 流体机械, 2015, 43(6): 76—81.
Zhao Zongbin, Zhu Binxiang, Li Jinhong, et al. Research status and prospect of air source heat pump drying technology[J]. Fluid Machinery, 2015, 43(6): 76—81. (in Chinese with English abstract)
- [17] 林羨, 邓彩玲, 徐玉娟, 等. 不同高温热泵干燥条件对龙眼干品质的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(4): 30—34.
Lin Xian, Deng CaiLing, Xu Yujuan, et al. Effects of different high temperature heat pump drying conditions on the quality of dried longan[J]. Food Science, 2014, 35(4): 30—34. (in Chinese with English abstract)
- [18] 潘年龙, 吴凯, 王孝荣, 等. 黄花菜的热泵干燥工艺研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(11): 259—262.
Pan Nianlong, Wu Kai, Wang Xiaorong, et al. Study on pump drying process of daylily[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(11): 259—262. (in Chinese with English abstract)
- [19] 张艳来, 龙成树, 尹凯丹, 等. 西洋菜热泵干燥特性试验研究[J]. 东北农业大学学报, 2014(11): 1—7.
Zhang Yanlai, Long Chengshu, Yin Kaidan, et al. Experimental study on drying heat pump characteristics of watercress (Nasturtium Officinale)[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2014(11): 1—7. (in Chinese with English abstract)
- [20] 陈万庆. 浅谈热泵技术[J]. 中国新技术新产品, 2012, 3: 124.
Chen Wanqing. Talk about heat pump drying technology[J]. China New Technologies and Products, 2012, 3: 124. (in Chinese with English abstract)
- [21] 李敏, 吴宝川, 关志强, 等. 适宜添加剂预处理提高罗非鱼片冻融-热泵干燥品质[J]. 农业工程学报, 2014, 30(17): 295—303.
Li Min, Wu Baochuan, Guan Zhiqiang, et al. Improving quality of tilapia fillets freeze-thaw combined with heat pump drying using suitable additive pretreatment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(17): 295—304. (in Chinese with English abstract)
- [22] 李梁, 吉建邦, 康效宁, 等. 含水量对槟榔干质地的影响研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(19): 111—113.
Li Liang, Ji Jianbang, Kang Xiaoning, et al. Study on the influence of water content to texture of dried areca nuts[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(19): 111—113. (in Chinese with English abstract)

Technologic parameter optimization in pilot-scale process of heat pump drying of *Areca catechu* L.

Zhang Ronghu¹, Gao Yuanneng², Feng Jiancheng³, Xie Hui¹,
Deng Hao¹, Zhuang Guanghui¹, Dou Zhihao^{1*}

(1. Institute of Processing & Design of Agroproducts, Hainan Academy of Agricultural Science, Haikou 571100, China;

2. Hainan Quanneng Energy Co. Ltd, Wanning 571500, China;

3. College of Materials and Chemical Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: *Areca catechu* L. belongs to perennial aiphyllium of palmae. It has very high medicinal value and is regarded as the first one of 4 kinds of the south medicines in China. *Areca catechu* L. abounds in Hainan, 10% for fresh food, more than 90% dried for further processing, *Areca catechu* L. drying has become the important processing industry in Hainan, the annual output of dried betel nut is about 200 000 t, and the annual output value is more than 10 billion yuan. For the *Areca catechu* L. drying, there are hot air drying and vacuum freeze drying, which have not been applied in production because of the limitation of experimental conditions and equipments, and the traditional furnace drying, steam drying and heat pump drying are used in production. The traditional furnace drying is a kind of small workshop processing, and its characteristics of small scale, large labor intensity and serious pollution are difficult to adapt to the modern agriculture development, so it has been gradually eliminated. For the steam drying whose heat source is from the burning coal, the characteristic of large scale and high mechanical strength adapts to the intensive agricultural product processing development, however it is limited because of a lot of greenhouse gases emitted from burning coal. Only the energy-conservation and environment-protection drying method is suitable for the *Areca catechu* L. drying industry's sustainable and healthy development. The betel nut drying was studied using the heat pump drying equipment in this paper. The influences of boiling time on betel nut hardness, and drying temperature and loading capacity on moisture content of dried fruit were analyzed via the single factor experiment. The technology parameters of heat pump drying were optimized by the orthogonal experiment, and the quality of the dried betel nut was evaluated using the weighted score method. After 30-day storage, the physical, chemical and microbiological indicators of the dried fruits were detected, and moreover, the advantages and benefits were analyzed based on the comparison between the heat pump drying method and the steam drying and traditional drying methods. The optimum drying parameters were: boiling time of 15 min, initial drying time of 12 h at 50°C, following drying time of 84 h at 65°C, loading capacity of 3.5 t, 25% air relative humidity of dried room, and 16.8% water content of betel nut. The results showed as follows: the ratio of good dried fruit was 96%, the uniformity of dried fruit was 91%, the power consumption of dried fruit was 0.92 (kW·h)/kg, the comprehensive score of dried betel nut quality was 90.1, and the color of dried fruit was either olive yellow or brown. After 30-day storage at 25°C, the dried fruit did not mildew, and the physical and chemical indicators were in the controllable range. The cost of drying betel nut by heat pump was more economical, 11% lower than that of the steam drying and 50% lower than that of the traditional drying. The heat pump drying had the advantages of energy saving, low emissions, intelligent operation, low drying cost and good economic benefit. The research results provide the technical reference for the standardized processing of the betel fruit with the heat pump drying method.

Keywords: drying; processing; optimization; heat pump; betel nut; weighted score value method