

# 板栗气体射流冲击干燥特性和工艺优化

娄 正, 高振江<sup>\*</sup>, 肖红伟, 王晓拓, 李 伟, 孙新超

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

**摘 要:** 为了解决板栗深加工中的干燥问题, 将气体射流冲击干燥技术应用于板栗干燥, 研究了板栗仁在不同风温 (70、75、80 和 85℃) 和风速 (10、12、14 和 16 m/s) 下的干燥特性; 根据单因素试验结果进行了风温、风速和预处理 (不烫漂、100℃热水烫漂和 100℃蒸汽烫漂) 的正交试验。试验结果表明: 板栗的整个干燥过程属于降速干燥, 风温和风速对板栗的干燥速率均有显著影响, 但风温对其的影响比风速更为突出; 正交试验各因素对明亮度、蓝黄值和感官评分的影响顺序为: 预处理>风温>风速, 对缩短板栗干燥时间的影响顺序为: 风温>风速>预处理, 正交试验最佳优化工艺参数为风温 80℃, 风速 14 m/s, 100℃蒸汽烫漂。该研究为气体射流冲击干燥技术应用于板栗的干燥提供了技术依据。

**关键词:** 干燥, 工艺, 农产品, 气体射流冲击

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.11.062

中图分类号: S375, S664.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2010)-11-0368-06

娄 正, 高振江, 肖红伟, 等. 板栗气体射流冲击干燥特性研究和工艺优化[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 368—373.  
Lou Zheng, Gao Zhenjiang, Xiao Hongwei, et al. Air impingement drying characteristics and process optimization of chestnut[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 368—373. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

板栗俗称栗子, 山毛榉科植物栗属, 属坚果类, 具有很高的营养价值和经济效益。板栗养胃健脾, 补肾强筋, 深受人们喜爱。中国是世界板栗的生产大国, 总产量常年居世界首位, 2008 年板栗出口 4.7 万 t, 产值达到 6.4 万美元<sup>[1]</sup>。新鲜板栗含水率较高, 不耐贮藏, 每年因霉烂、生虫、发芽、失水等造成的损失达总产量的 20%~30%, 严重可达 70%<sup>[2]</sup>, 造成了板栗资源的极大浪费, 严重限制了板栗的运输、贮藏以及出口<sup>[3]</sup>。因此, 发展板栗系列产品的深加工就很有必要<sup>[4]</sup>。

板栗深加工是现今发展的趋势, 不仅可以解决板栗大量损失的严重问题, 而且可以创造更高的经济效益, 对于中国板栗行业具有重要的意义。板栗鲜果的含水率通常在 40%~60% 范围内变化<sup>[5]</sup>, 其各种深加工技术中大多数要进行不同程度的预干燥, 板栗脱水干燥是板栗深加工之前以及加工过程中的重要处理环节。因此, 为了提高板栗干制的品质、缩短干制时间, 将现代化的干燥技术应用于板栗干燥势在必行。

李云雁<sup>[6]</sup>等在使用真空干燥法制备脱水板栗片的研究中发现, 在干燥初始的 0~25 min 内板栗存在等速干燥段。周洁, 孔晓玲, 高楠<sup>[7]</sup>将微波和热风联合干燥技术应用于板栗的干燥, 研究表明热风干燥温度为 35~65℃时, 板栗热风干燥速度受干燥温度影响较大, 温度越高, 脱

水越快。Guiné 和 Ferdandes<sup>[8]</sup>研究了 3 种不同种类的欧洲栗的热风干燥特性, 结果表明干燥温度为 70~90℃时, 温度对干燥过程的影响非常显著, 温度越高干燥速率越快, 较高的温度在脱水过程中可以带来巨大的经济效益。郑传祥<sup>[9]</sup>研究了板栗 (带壳) 热风干燥特性, 认为板栗在 65℃以下干燥几乎不会发生品质的改变, 但是太低的干燥温度将使板栗干燥速度很慢。常学东<sup>[10]</sup>研究了不同干燥方式对板栗褐变的影响, 对于切片烘干而言, 采用 80℃、切片厚度 0.7 cm 为最佳工艺参数, 褐变程度最浅。

气体射流冲击干燥技术是一种新的干燥技术, 与传统的热风干燥技术相比具有较高的对流换热系数和干燥速度<sup>[11]</sup>。气体射流冲击干燥技术现在已经被成功应用于纸张等的干燥中。在农产品加工领域, 气体射流冲击干燥技术已经被用于玉米种子<sup>[12]</sup>、胡萝卜<sup>[13]</sup>、葡萄<sup>[14]</sup>等物料的干燥, 取得了显著的效果。

本研究将气体射流冲击干燥技术应用于板栗的干燥, 研究板栗的气体射流冲击干燥曲线, 以考察不同的干燥温度和风速对板栗气体射流冲击干燥特性的影响, 并通过研究温度、风速和预处理对板栗干燥时间的影响, 优化工艺参数, 为此技术应用于板栗深加工提供技术依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验所用原料是新鲜的板栗 (品种是燕昌红), 由北京燕昌红板栗专业合作社提供。板栗直径范围 25~35 mm, 平均湿基含水率为 52.6%±0.4% (烘干法测定, 105℃烘 24 h)。试验前将板栗放于纸箱中并将其置于 (5±1)℃的冰箱中保存。

### 1.2 试验设备

气体射流冲击干燥机由中国农业大学工学院农产品加工技术与装备实验室设计研发, 如图 1 所示。其主要

收稿日期: 2010-04-30 修订日期: 2010-11-05

基金项目: 国家“863”项目 (2007AA100406-04)

作者简介: 娄 正 (1984—), 男, 博士生, 研究方向: 现代农业装备与计算机测控。北京 中国农业大学工学院, 100083。Email: chris.lz@163.com  
\*通信作者: 高振江 (1958—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农产品的加工技术与装备研究。北京市海淀区清华东路 17 号 194 信箱, 100083。

Email: zjgao@cau.edu.cn

由气体射流冲击主体装置（射流冲击回风管道、离心风机、电加热管、进风管道、气流分配室、干燥室等）、温湿度控制和采集系统 2 部分组成。干燥的主要参数（温度、风速和湿度）在一定的范围内可以调节。温度控制系统采用模糊 PID（proportion integration differentiation, PID）自编程控制器，控制精度为 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ ，风速控制使用 ASC100 变频器。气流喷嘴与物料之间的距离为 10 cm，物料托盘的面积为  $30\text{ cm}\times 25\text{ cm}$ 。

HX-7.5D 型全自动电加热蒸汽发生器（上海华征热能设备有限公司），用于板栗蒸汽烫漂，与气体射流冲击干燥机相连，如图 1 中 1 所示；DK-S22 型电热恒温水浴锅（上海精宏实验设备有限公司），用于板栗热水烫漂；SMY-2000ST 型测色色差计（北京盛名扬科技开发有限责任公司），用于测量板栗色泽。

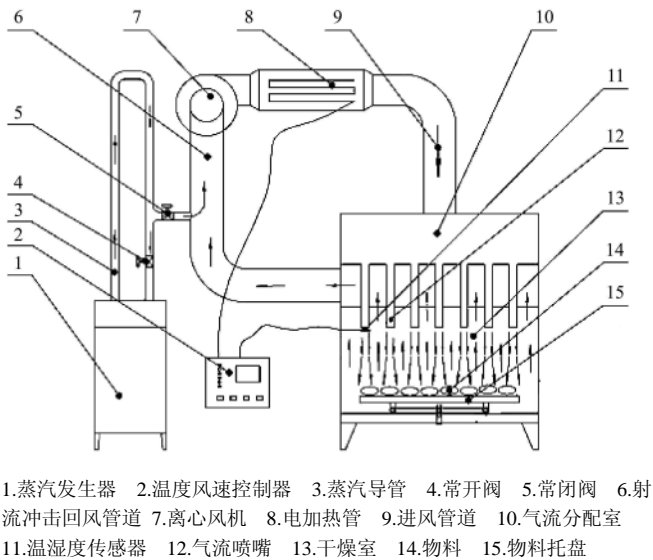


图 1 气体射流冲击干燥试验装置  
Fig.1 Schematic diagram of air impingement drying equipment

1.3 试验方法

从冰箱中取出保存的板栗，等待其温度达到室温。选取直径大小相差不大，无发芽，无霉变，颗粒饱满的板栗作为试验物料。板栗去壳，去红衣，预处理。预处理方式为：①不烫漂，②在  $100^{\circ}\text{C}$  条件下进行 120 s 的蒸汽烫漂<sup>[15]</sup>，③在  $100^{\circ}\text{C}$  条件下进行 120 s 的热水烫漂。烫漂用来使板栗中的酶灭活，以防止其干燥时褐变。将板栗均匀地单层摆放在物料托盘上，相邻的板栗之间不重叠。然后将板栗采用不同的风温和风速进行气体射流冲击干燥试验，每隔 1 h 测定样品的质量变化，直到板栗湿基含水率降到 25%（干基含水率为 33.3%）时停止试验。每组试验重复 3 次。

1) 不同风温条件下板栗的干燥试验

根据前期预试验的结果，风速选定为 14 m/s 不变，风温分别为 70、75、80 和  $85^{\circ}\text{C}$ ，预处理方式为不烫漂。

2) 不同风速条件下板栗的干燥试验

根据前期预试验的结果，风温选定为  $80^{\circ}\text{C}$  不变，风速分别为 10、12、14 和 16 m/s，预处理方式为不烫漂。

3) 板栗干燥正交试验

根据单因素试验结果，对风温、风速和预处理 3 个因素进行 3 个水平的正交试验。以确定影响板栗干燥的最佳水平，找出最佳工艺条件。选择  $L_9(3^4)$  正交表，各因素水平见表 1。

| 表 1 正交试验因素水平设计   |                        |                                    |      |
|--|------------------------|------------------------------------|------|
| Table 1 Factors and levels of orthogonal test $L_9(3^4)$ |                        |                                    |      |
| 水平   | 风温/ $^{\circ}\text{C}$ | 风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | 预处理  |
| 1  | 75                     | 12                                 | 不烫漂  |
| 2  | 80                     | 14                                 | 热水烫漂 |
| 3  | 85                     | 16                                 | 蒸汽烫漂 |

1.4 干燥曲线的数学计算方法

板栗气体射流冲击干燥过程中的干燥曲线采用干基含水率（moisture content on dry basis）随干燥时间变化的曲线。不同干燥时间板栗的干基含水率（ $M_t$ ），如式（1）所示

$$M_t = \frac{W_t - G}{G} \times 100\%$$
 (1)

式中： $W_t$ 为板栗在任意干燥  $t$  时刻的总质量，g； $G$ 为板栗的干物质质量，g。

干燥速率（drying rate）的计算采用如下公式

$$DR = \frac{M_{t_1} - M_{t_2}}{t_2 - t_1}$$
 (2)

式中， $DR$  为干燥过程中时间在  $t_1$  和  $t_2$  (h) 之间的板栗干燥速率，%/h； $M_{t_1}$  和  $M_{t_2}$  为时间为  $t_1$  和  $t_2$  时板栗的干基含水率，%。

1.5 感官评价指标

1) 明亮度：采用 CIELAB 表色系统（亦称  $L^*a^*b^*$  表色系），以仪器白板色泽为标准，用明亮度  $L^*$  间接反映色泽好坏， $L^*$  值越大，板栗色泽越亮，表示产品颜色越好。其中  $L^*=0$  表示黑色， $L^*=100$  表示白色。

2) 蓝黄值：采用 CIELAB 表色系统（亦称  $L^*a^*b^*$  表色系），以仪器白板色泽为标准，用蓝黄值  $b^*$  间接反映色泽好坏， $b^*$  值越大，板栗色泽越黄，表示产品颜色越好。其中  $b^*$  的范围是 -60（纯蓝色）~+60（纯黄色）。

3) 感官评分：试验结束后将干燥后的栗仁由 6~12 人组成的评价小组评价，取平均分。具体评分细则如表 2 所示。

| 表 2 感观评分标准表                      |                |     |
|----------------------------------|----------------|-----|
| Table 2 Sensory grading standard |                |     |
| 指标                               | 评价标准           | 满分  |
| 口感                               | 具有一定的弹性和咀嚼度    | 1.5 |
| 气味                               | 具有板栗特有的香味      | 1.5 |
| 组织形态                             | 栗仁坚实饱满，无裂缝破损   | 2   |
| 性状                               | 栗仁表面无熟化，淀粉无糊化  | 2   |
| 色泽                               | 栗仁呈金黄色，有光泽，无褐变 | 3   |

4) 干燥时间：试验中我们将相同初始含水率的板栗仁经过不同预处理后，在不同的风温和风速下进行干燥，观察其干燥到湿基含水率 25%（干基含水率为 33.3%）时停止试验终了含水率时所用的时间长短，来判断不同因

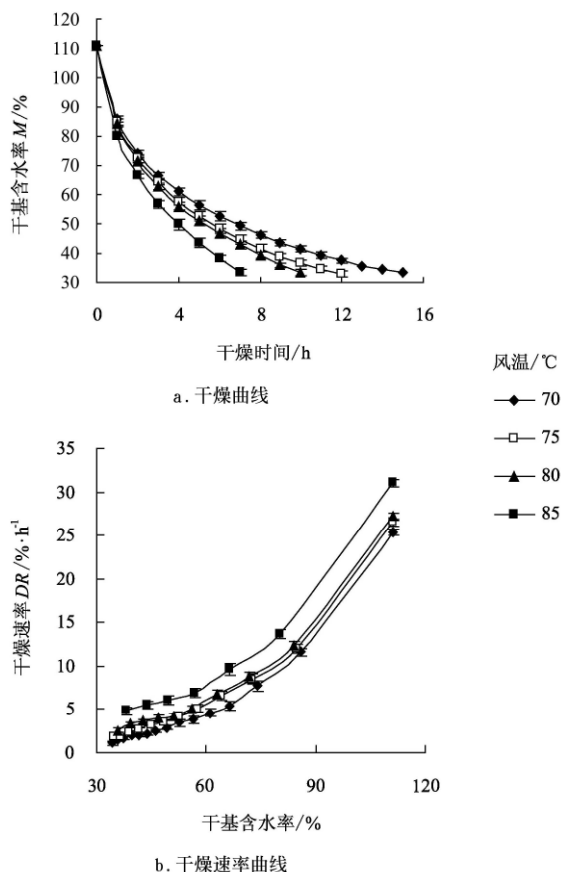
素对其干燥时间的影响是否显著。干燥时间越短, 能耗越低, 效率越高。

事实上经过不同预处理后, 板栗表面淀粉会发生不同程度的糊化现象, 并造成板栗仁含水率发生变化, 导致了其干燥曲线和干燥时间的不同, 这正是不同预处理对板栗干燥产生影响的原因所在。

## 2 结果与分析

### 2.1 风温对板栗干燥的影响

将风速固定在 14 m/s, 进行不同风温条件下干燥试验, 根据试验结果得到板栗的干燥曲线和干燥速率曲线, 如图 2 所示。由图 2a 可以看出板栗的干基含水率随着干燥时间的延长而呈现降低的趋势, 其中风温越高干燥耗时越短, 含水率降低越快。干燥风温分别为 70、75、80 和 85℃条件下, 板栗干燥时间分别为 15、12、10 和 7 h。板栗在干燥风速为 14 m/s 时, 干燥风温为 85℃条件下的干燥时间比其在 70℃条件下缩短了 50.3%。当风温高于 80℃时, 干燥时间明显缩短。



注: 风速为 14 m/s, 预处理方式为不烫漂

图 2 不同风温下板栗的干燥曲线及干燥速率曲线

Fig.2 Drying curves and drying rate curves of chestnut under different air temperatures

由图 2b 可以看出, 风温越高, 板栗干燥速率越大。随着含水率的降低, 干燥速率逐渐下降, 干燥过程没有出现明显的恒速干燥阶段, 只有降速阶段。这可能是因为板栗仁在干燥过程中其水分蒸发的界面随着干燥过程

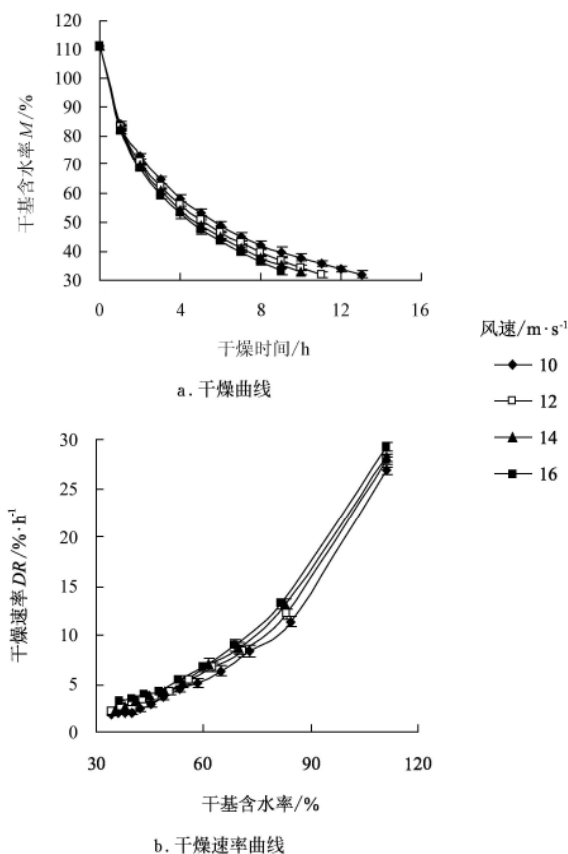
的进行不断向内部迁移, 水分迁移的距离不断增加, 而导致干燥速率的逐渐降低<sup>[16]</sup>。

在上述不同的干燥风温条件下, 干燥后板栗的色泽呈金黄色或者深黄色, 部分板栗干燥后的颜色略暗, 但是总体感官品质均可以接受。这可能是因为板栗在干燥的过程中由过氧化物酶和多酚氧化酶引起了酶促褐变, 以及发生了美拉德反应导致的褐变。

### 2.2 风速对板栗干燥的影响

设定风温为 80℃, 进行不同风速下的板栗干燥试验, 根据试验结果得到板栗的干燥曲线和干燥速率曲线, 如图 3 所示。由图 3a 可以看出板栗的干基含水率随着干燥时间的延长而呈现降低的趋势, 其中风速越高干燥耗时越短, 含水率降低越快。干燥风速分别为 10、12、14 和 16 m/s 时, 对应干燥时间分别 13、11、10 和 9 h。板栗干燥风温为 80℃时, 干燥风速为 16 m/s 条件下的干燥时间比在 10 m/s 条件下的缩短了 30.8%。

由图 3b 可以看出, 风速越高, 板栗干燥速率越大。不同风速下板栗干燥也只有降速干燥阶段。在上述不同的干燥风速条件下, 干燥后板栗的色泽较明亮, 呈金黄色, 感官品质较好。



注: 风温为 80℃, 预处理方式为不烫漂

图 3 不同风速下板栗的干燥曲线及干燥速率曲线

Fig.3 Drying curves and drying rate curves of chestnut under different air velocities

由表 3 单因素试验方差分析表可知, 风温和风速对板栗干燥时间都有显著的影响。而且在试验范围内干燥风温对干燥时间的影响比风速对其的影响更突出。

表 3  单因素试验方差分析表  
Table 3  Analysis of variance for single factor experiment

| 差异源 | 风温试验方差分析 |     |        |            |            | 风速试验方差分析 |     |       |            |            |
|-----|----------|-----|--------|------------|------------|----------|-----|-------|------------|------------|
|     | 平方和      | 自由度 | 均方差    | <i>F</i> 值 | <i>P</i> 值 | 平方和      | 自由度 | 均方差   | <i>F</i> 值 | <i>P</i> 值 |
| 组间  | 100.25   | 3   | 33.417 | 66.833     | 5.25E-06   | 39       | 3   | 13    | 39         | 4.02E-05   |
| 组内  | 4        | 8   | 0.5    |            |            | 2.667    | 8   | 0.333 |            |            |
| 总计  | 104.25   | 11  |        |            |            | 41.667   | 11  |       |            |            |

注：显著性水平  $\alpha = 0.1$ 。

## 2.3 正交试验结果与分析

### 2.3.1 极差分析

正交试验各因素水平组合和试验结果如表 4 所示。由表 5 正交试验极差分析表可知，对明亮度和蓝黄值影响顺序为： $C>A>B$ ，即为：预处理 $>$ 风温 $>$ 风速。根据极差分析得出的较优组合为  $A_1B_3C_3$ ，即：板栗 100℃蒸汽烫漂，风温 75℃，风速 16 m/s。

感官评分最高的是试验 3，其组合为  $A_1B_3C_3$ 。极差分析显示影响感官评分的因素顺序为： $C>A>B$ ，即为：预处理 $>$ 风温 $>$ 风速。根据极差分析得出的较优组合为  $A_1B_1C_3$ ，不在 9 组正交试验中，即：板栗 100℃蒸汽烫漂，风温 75℃，风速 12 m/s。对其进行验证试验，经验证试验表明，在此工艺条件下其综合评分为 8.5，高于其他组合。

在 9 组试验中，干燥时间最短的是试验 8 和试验 9，其组合为  $A_3B_2C_1$  和  $A_3B_3C_2$ ，干燥时间为 7 h。根据极差分析得出的最佳组合为  $A_3B_3C_1$  和  $A_3B_3C_2$ ，其中组合  $A_3B_3C_1$  不在 9 组正交试验中，而组合  $A_3B_3C_2$  在 9 组正交试验中。考虑到烫漂预处理的灭酶防褐变效果，组合  $A_3B_3C_2$  为较优工艺，即：板栗 100℃热水烫漂，风温 85℃，

风速 16 m/s。极差分析显示对缩短干燥时间贡献由大到小的因素为： $A>B>C$ ，即为：风温 $>$ 风速 $>$ 预处理。风温和风速对干燥时间的影响效果与单因素试验基本一致。

表 4  正交试验设计和结果  
Table 4  Design and Results of orthogonal experiment

| 试验序号 | 因  素          |                                  |            | 各指标试验结果                      |                              |          |            |
|------|---------------|----------------------------------|------------|------------------------------|------------------------------|----------|------------|
|      | A<br>风温/<br>℃ | B<br>风速/<br>(m·s <sup>-1</sup> ) | C<br>预处理方式 | 明亮度<br><i>L</i> <sup>*</sup> | 蓝黄值<br><i>b</i> <sup>*</sup> | 感官<br>评分 | 干燥<br>时间/h |
| 1    | 1(75)         | 1(12)                            | 1(不烫漂)     | 71.17                        | 22.11                        | 7.0      | 12         |
| 2    | 1(75)         | 2(14)                            | 2(热水烫漂)    | 74.72                        | 24.52                        | 7.0      | 11         |
| 3    | 1(75)         | 3(16)                            | 3(蒸汽烫漂)    | 77.89                        | 28.75                        | 8.0      | 11         |
| 4    | 2(80)         | 1(12)                            | 2(热水烫漂)    | 73.03                        | 22.55                        | 7.0      | 10         |
| 5    | 2(80)         | 2(14)                            | 3(蒸汽烫漂)    | 75.18                        | 28.72                        | 7.5      | 10         |
| 6    | 2(80)         | 3(16)                            | 1(不烫漂)     | 69.69                        | 20.33                        | 6.0      | 9          |
| 7    | 3(85)         | 1(12)                            | 3(蒸汽烫漂)    | 74.36                        | 27.78                        | 7.0      | 9          |
| 8    | 3(85)         | 2(14)                            | 1(不烫漂)     | 66.08                        | 20.10                        | 5.5      | 7          |
| 9    | 3(85)         | 3(16)                            | 2(热水烫漂)    | 73.49                        | 26.15                        | 6.5      | 7          |

表 5  正交试验极差分析表  
Table 5  Analysis of range for orthogonal experiment

|                       | 明亮度 <i>L</i> <sup>*</sup> |                       |                       | 蓝黄值 <i>b</i> <sup>*</sup> |                       |                       | 感官评分                  |                       |                       | 干燥时间/h                |                       |   |
|-----------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---|
|                       | A                         | B                     | C                     | A                         | B                     | C                     | A                     | B                     | C                     | A                     | B                     | C   |
| <i>K</i> <sub>1</sub> | 223.78                    | 218.56                | 206.94                | 75.38                     | 72.44                 | 62.54                 | 22                    | 21                    | 18.5                  | 34                    | 31                    | 28  |
| <i>K</i> <sub>2</sub> | 217.9                     | 215.98                | 221.24                | 71.6                      | 73.34                 | 73.22                 | 20.5                  | 20                    | 20.5                  | 29                    | 28                    | 28  |
| <i>K</i> <sub>3</sub> | 213.93                    | 221.07                | 227.43                | 74.03                     | 75.23                 | 85.25                 | 19                    | 20.5                  | 22.5                  | 23                    | 27                    | 30  |
| <i>k</i> <sub>1</sub> | 74.59                     | 72.85                 | 68.98                 | 25.13                     | 24.15                 | 20.85                 | 7.33                  | 7                     | 6.16                  | 11.33                 | 10.33                 | 9.33  |
| <i>k</i> <sub>2</sub> | 72.63                     | 71.99                 | 73.75                 | 23.87                     | 24.45                 | 24.41                 | 6.67                  | 6.67                  | 6.83                  | 9.67                  | 9.33                  | 9.33  |
| <i>k</i> <sub>3</sub> | 71.31                     | 73.69                 | 75.81                 | 24.68                     | 25.08                 | 28.42                 | 6.5                   | 6.83                  | 7.5                   | 7.67                  | 9                     | 10  |
| <i>R</i>              | 3.28                      | 1.7                   | 6.83                  | 1.26                      | 0.93                  | 7.57                  | 0.83                  | 0.33                  | 1.34                  | 3.66                  | 1.33                  | 0.67  |
| 较优水平                  | <i>A</i> <sub>1</sub>     | <i>B</i> <sub>3</sub> | <i>C</i> <sub>3</sub> | <i>A</i> <sub>1</sub>     | <i>B</i> <sub>3</sub> | <i>C</i> <sub>3</sub> | <i>A</i> <sub>1</sub> | <i>B</i> <sub>1</sub> | <i>C</i> <sub>3</sub> | <i>A</i> <sub>3</sub> | <i>B</i> <sub>3</sub> | <i>C</i> <sub>1</sub> 、 <i>C</i> <sub>2</sub> |
| 主次因素                  | C                         | A                     | B                     | C                         | A                     | B                     | C                     | A                     | B                     | A                     | B                     | C   |

### 2.3.2 方差分析

正交试验方差分析结果见表 6。在显著性水平为 0.1 的条件下，风温对明亮度，感官评分和干燥时间都有显著的影响，风温越高板栗越暗且感官评分越低，但是干燥时间会缩短；风温越低板栗越明亮且感官评分越高，但是干燥时间越长。在显著性水平为 0.1 的条件下，风速对干燥时间的影响显著，风速越高干燥时间越短，风速越低干燥时间越长，而其对干燥后的板栗明亮度、蓝黄

值和感官评分并没有显著的影响。在显著性水平为 0.1 的条件下，预处理对明亮度，蓝黄值，感官评分都有显著的影响，经过蒸汽烫漂预处理的板栗在品质上表现出明显的优势，即板栗更加明亮，颜色更加金黄，感官评分更高。

由极差分析和方差分析结果可以看出，对于板栗的明亮度、蓝黄值和感官评分，预处理是影响较大的因素，而风温和风速的影响较小，其中风温的影响略大于风速，

选择较优预处理方式为100℃蒸汽烫漂；对于板栗的干燥时间，风温和风速是影响较大的因素，其中风温的影响略大于风速，而预处理的影响较小，但是较高的温度严重影响板栗的干燥色泽和品质，综合考虑选择较优风温为80℃；风速对于其他各项指标影响均较小，但是较低的风速会导致干燥时间过长进而大大增加能耗，综合考虑选择较优风速为14 m/s。综上所述，选择正交试验中的组合5：A<sub>2</sub>B<sub>2</sub>C<sub>3</sub>为较优工艺，即：板栗100℃蒸汽烫漂，风温80℃，风速14 m/s。在此工艺条件下试验结果为：明亮度75.18，蓝黄值28.72，感光评分7.5，干燥时间10 h。通过对比可以看出，在此工艺条件下各项指标结果均较好。

表6 正交试验方差分析表

Table 6 Analysis of variance for orthogonal experiment

|      | 数据源 | 平方和    | 自由度 | 均方差    | F 值    | P 值   |
|------|-----|--------|-----|--------|--------|-------|
| 明亮度  | 风温  | 16.373 | 2   | 8.187  | 11.938 | 0.077 |
|      | 风速  | 4.318  | 2   | 2.159  | 3.149  | 0.241 |
|      | 预处理 | 73.627 | 2   | 36.814 | 53.684 | 0.018 |
|      | 误差  | 1.371  | 2   | 0.686  |        |       |
|      | 总和  | 95.690 | 8   |        |        |       |
| 蓝黄值  | 风温  | 2.446  | 2   | 1.223  | 0.427  | 0.701 |
|      | 风速  | 1.352  | 2   | 0.676  | 0.236  | 0.809 |
|      | 预处理 | 86.059 | 2   | 43.029 | 15.018 | 0.062 |
|      | 误差  | 5.730  | 2   | 2.865  |        |       |
|      | 总和  | 95.587 | 8   |        |        |       |
| 感官评分 | 风温  | 1.500  | 2   | 0.750  | 9.000  | 0.099 |
|      | 风速  | 0.167  | 2   | 0.083  | 1.000  | 0.501 |
|      | 预处理 | 2.667  | 2   | 1.333  | 16.000 | 0.059 |
|      | 误差  | 0.167  | 2   | 0.083  |        |       |
|      | 总和  | 4.500  | 8   |        |        |       |
| 干燥时间 | 风温  | 20.222 | 2   | 10.111 | 91.000 | 0.011 |
|      | 风速  | 2.889  | 2   | 1.444  | 13.000 | 0.071 |
|      | 预处理 | 0.889  | 2   | 0.444  | 4.000  | 0.199 |
|      | 误差  | 0.222  | 2   | 0.111  |        |       |
|      | 总和  | 24.222 | 8   |        |        |       |

注：显著性水平  $\alpha = 0.1$ 。

### 3 结 论

1) 干燥风温和风速均对板栗的干燥时间有显著影响，且干燥时间随着干燥风温和风速的提高而减少，但干燥风温对干燥速率的影响比干燥风速更为突出。板栗的气体射流冲击干燥属于降速干燥。

2) 正交试验结果显示对于板栗的明亮度、蓝黄值和感官评分，预处理是影响较大的因素，而风温和风速的影响较小，其中风温的影响略大于风速；对于板栗的干燥时间，风温和风速是影响较大的因素，其中风温的影响略大于风速，而预处理的影响较小；风速对于其他各项指标影响均较小。正交试验较佳优化工艺组合为板栗100℃蒸汽烫漂，风温80℃，风速14 m/s。

3) 在试验范围内的不同工艺条件下，板栗干燥的感官品质均可以接受，且干燥前的预处理对板栗的干燥品质有重要的影响。今后仍需要进一步研究板栗在干燥过程中干燥品质的变化，可以重点以色泽、质地和营养成分为指标来研究其变化的动力学。

### 【参 考 文 献】

- [1] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [2] 唐时俊, 王小明, 李昌珠, 等. 板栗贮藏保鲜新技术的研究[J]. 中国南方果树, 2001, 30(6): 38—41.  
Tang Shijun, Wang Xiaoming, Li Changzhu, et al. Storage and preservation technology of chestnut[J]. South China Fruits, 2001, 30(6): 38—41. (in Chinese with English abstract)
- [3] 王清章, 严守雷, 彭光华, 等. 板栗贮藏方法对比研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4): 127—130.  
Wang Qingzhang, Yan Shoulei, Peng Guanghua, et al. Comparative studies on storage methods of Chinese chestnut[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(4): 127—130. (in Chinese with English abstract)
- [4] 叶兴乾, 刘东红, 张贵平, 等. 不同干燥方法对栗粉的理化性质与功能特性的影响[J]. 农业工程学报, 2001, 17(4): 95—98.  
Ye Xingqian, Liu Donghong, Zhang Guiping, et al. Effect of drying methods on the physicochemical and functional properties of chestnut flour[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(4): 95—98. (in Chinese with English abstract)
- [5] 刘洁, 李小昱, 李培武, 等. 基于近红外光谱的板栗水分检测方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 338—341.  
Liu Jie, Li Xiaoyu, Li Peiwu, et al. Determination of moisture in chestnuts using near infrared spectroscopy[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2): 338—341. (in Chinese with English abstract)
- [6] 李云雁, 宋光森, 丁钊军, 等. 真空干燥法制备脱水板栗片的研究[J]. 现代食品科技, 2006, 22(3): 90—92.  
Li Yunyan, Song Guangsen, Ding Zhaojun, et al. Development of dehydrated sliced chestnut by vacuum-drying[J]. Modern Food Science and Technology, 2010, 22(3): 90—92. (in Chinese with English abstract)
- [7] 周洁, 孔晓玲, 高楠. 微波与热风组合干燥对板栗干燥特性的影响[J]. 包装与食品机械, 2009, 27(2): 11—13, 51.  
Zhou Jie, Kong Xiaoling, Gao Nan. Effects of combination of microwave and hot-air drying on characteristics of chestnuts[J]. Packaging and Food Machinery, 2009, 27(2): 11—13, 51. (in Chinese with English abstract)
- [8] Guiné R P F, Fernandes R M C. Analysis of the drying kinetics of chestnuts[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 76(3): 460—467.
- [9] 郑传祥. 板栗干燥特性及干燥机的开发研究[J]. 中国粮油学报, 2001, 16(5): 55—57.  
Zheng Chuanxiang. Chestnut's drying character and chestnut dryer[J]. Chinese Cereals and Oils Association, 2001, 16(5): 55—57. (in Chinese with English abstract)
- [10] 常学东. 板栗干燥特性及其对干后品质的影响[D]. 天津:

- 天津科技大学, 2004.
- Chang Xuedong. The drying characteristic of Chinese Chestnut and its Effects on Quality of Dry Products[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [11] 高振江. 气体射流冲击颗粒物料干燥机理与参数试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2000.
- Gao Zhenjiang. Experimental Research on Mechanism and Parameters of Air-Impingement Jet Dryign of Particulate Materials[D]. Beijing: China Agricultural University, 2000. (in Chinese with English abstract)
- [12] 姚雪东, 肖红伟, 高振江, 等. 气流冲击式转筒干燥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(10): 67—70.
- Yao Xuedong, Xiao Hongwei, Gao Zhenjiang, et al. Design and experiment of air-impingement rotary dryer[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 40(10): 67—70. (in Chinese with English abstract)
- [13] 杜志龙, 高振江, 温朝晖, 等. 胡萝卜的气体射流冲击烫漂与干燥试验研究[J]. 粮食和食品工业, 2010, 17(1): 22—26.
- Du Zhilong, Gao Zhenjiang, Wen Zhaohui, et al. Experimental study of blanching and drying of carrots in air-jet impingement oven[J]. Cereal and Food Industry, 2010, 17(1): 22—26. (in Chinese with English abstract)
- [14] Xiao Hongwei, Pang Changle, Wang Lihong, et al. Drying kinetics and quality of Monukka seedless grapes dried in an air-impingement jet dryer[J]. Biosystems Engineering, 2010, 105(2): 233—240.
- [15] 肖红伟, 张世湘, 白竣文, 等. 杏子的气体射流冲击干燥特性[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 318—323.
- Xiao Hongwei, Zhang Shixiang, Bai Junwen, et al. Air impingement drying characteristics of apricot[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(7): 318—323. (in Chinese with English abstract)
- [16] Purlis E, Salvadori V O. A moving boundary problem in a food material undergoing volume change-Simulation of bread baking[J]. Food Research international, 2010, 43(4): 949—958.

## Air impingement drying characteristics and process optimization of chestnut

Lou Zheng, Gao Zhenjiang<sup>\*</sup>, Xiao Hongwei, Wang Xiaotuo, Li Wei, Sun Xinchao

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** To solve the problems of drying in chestnut depth processing, air impingement drying technology was applied to chestnut drying in this paper. The drying characteristics of chestnut were investigated under different air temperatures (70, 75, 80 and 85℃) and air velocities (10, 12, 14 and 16 m/s). According to results of single factor tests, an orthogonal experiment was designed with the influential factors of air temperatures, air velocities and pretreatment (no blanching, 100℃ hot water blanching and 100℃ steam blanching). The results showed that the whole drying process belong to in the falling rate period, and the effect of drying temperature and air velocity on the drying rate was significant, while the effect of drying temperature was more significant than air velocity. The order of the parameters of the orthogonal experiment for increasing the  $L^*$ , the  $b^*$  and the sensory score of chestnut was air temperature>air velocity>pretreatment, and for decreasing the drying time of chestnut was air temperature>air velocity>pretreatment. The optimum processing parameters after orthogonal optimization were 100℃ steam blanching, 80℃ and 14m/s as its pretreatment, drying temperature and air velocity, respectively. This research can provide technical basis for applying the air impingement drying technology of chestnut.

**Key words:** drying, processing, agricultural products, air impingement