

香椿芽热泵式冷风干燥模型及干燥品质

任广跃, 刘军雷, 刘文超, 乔小全, 罗磊, 段续*

(河南科技大学食品与生物工程学院, 河南 洛阳 471023)

摘要:为获得干燥速率快、品质高的香椿芽制品,以新鲜香椿芽为原料对其进行冷风干燥处理,研究不同干燥条件下香椿芽的干燥特性;采用Weibull函数模型对干燥曲线进行拟合并分析干燥过程;以干燥时间、干燥能耗、叶绿素含量、VC含量以及复水率为指标对不同条件下香椿芽冷风干燥过程进行加权综合评价;以热风干燥和真空冷冻干燥为参照,对比研究较优冷风干燥参数下香椿芽干制品的品质。结果表明,提升干燥温度、进口风速以及减少装载厚度均能显著减少香椿芽冷风干燥耗时($P < 0.05$),不同干燥条件对干燥耗时的影响程度由大到小为:温度>进口风速>装载厚度;Weibull函数模型能够准确描述香椿芽冷风干燥过程中水分含量变化过程($R^2 > 0.9$),其形状参数均小于1,整个干燥过程为降速干燥,主要由内部水分扩散控制;香椿芽冷风干燥有效水分扩散系数在 $(6.272 \sim 9.637) \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 之间,均属于 10^{-9} 数量级,且受温度的影响最大;当干燥温度、装载厚度和进口风速分别为20℃、3.0 mm、2 m/s时,香椿芽冷风干燥的综合评分值最高,实验范围内,该条件较适合应用于香椿芽的冷风干燥中;相对于热风干燥而言,冷风干燥产品的品质更接近真空冷冻干燥产品的品质。

关键词:香椿芽;冷风干燥;模型;品质

Drying Modelling and Quality of *Toona sinensis* Subjected to Heat Pump Cold Air Drying

REN Guangyue, LIU Junlei, LIU Wenchao, QIAO Xiaoquan, LUO Lei, DUAN Xu*

(College of Food and Bioengineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: In order to obtain high drying rates and high-quality dried products, a heat pump dryer with cold air was applied to dry fresh *Toona sinensis*, and the drying characteristics under different drying conditions were investigated. The drying data were fitted to the Weibull distribution function and the drying process was analyzed by investigating the parameters of the Weibull distribution function. The weighted comprehensive evaluation of *Toona sinensis* under different drying conditions was carried out based on drying time, energy consumption, chlorophyll content, VC content and rehydration ratio. The quality of cold air dried products obtained under the optimum drying conditions was evaluated by comparing with hot air drying and freeze drying. Results showed that increased drying temperature and inlet velocity and reduced loading thickness significantly ($P < 0.05$) reduced the cold air drying time of *Toona sinensis*, and the effect of different drying conditions on drying time was in the decreasing order of temperature > inlet velocity > loading thickness. The Weibull distribution function could accurately describe the change in water content of *Toona sinensis* during cold air drying ($R^2 > 0.9$) with a shape parameter less than 1. The whole drying process was falling-rate drying, and was mainly controlled by internal moisture diffusion. The effective moisture diffusivity of *Toona sinensis* was in the range of $(6.272 \sim 9.637) \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, and it was influenced most significantly by drying temperature. The highest comprehensive score of cold air dried *Toona sinensis* was obtained under the conditions: drying temperature of 20℃, loading thickness of 3.0 mm and inlet velocity of 2 m/s. Compared with hot air drying, the quality of cold air dried products was closer to that of vacuum freeze dried products.

Key words: *Toona sinensis*; cold air drying; model; quality

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201623003

中图分类号: TS255.36

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2016)23-0013-07

引文格式:

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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201623003. <http://www.spkx.net.cn>

REN Guangyue, LIU Junlei, LIU Wenchao, et al. Drying modelling and quality of *Toona sinensis* subjected to heat pump cold air drying[J]. Food Science, 2016, 37(23): 13-19. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-201623003. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2016-06-01

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31271972); 河南省高校科技创新人才支持计划项目(14HASTIT023); 河南省高校科技创新团队支持计划项目(16IRTSTHN009)

作者简介: 任广跃(1971—), 男, 教授, 博士, 研究方向为农产品干燥技术与设备。E-mail: guangyueyao@163.com

*通信作者: 段续(1973—), 男, 教授, 博士, 研究方向为农产品干燥技术与设备。E-mail: duanxu_dx@163.com

香椿 (*Toona sinensis*)，系楝科香椿属落芽乔木^[1]，是中国特有珍贵速生用材树种，木材素有“中国桃花心木”之称^[2]。香椿全株具特殊气味，香椿芽富含钙、VC、磷、硫胺素等营养物质^[3]，是高级木本蔬菜，具有消炎、抗菌、抗氧化、抗病毒、抗过敏、消除自由基、调节血脂、软化血管和增强血管张力等功效^[4]，现多出口至日本及东南亚国家^[5]。然而，新鲜香椿含水量高，采收后仍处于旺盛的生理代谢状态，贮存时间短，且贮存过程中芽片易脱落、腐烂，导致营养、食用价值大幅降低^[6]。高水分含量新鲜香椿芽的干燥处理，是香椿加工过程中的重要环节^[7]。普通热风干燥是目前香椿芽脱水最常用的方式，但是物料干燥过程中极易发生表面过热现象，造成产品表面皱缩龟裂、内部结构破坏严重、营养损失大、复水率小^[8-12]；真空冷冻干燥能够得到干燥品质高的产品，但其耗能高^[13]，不适合应用于工业生产。

热泵干燥是一种利用热泵除湿原理来除去空气中所含水分、调节空间温度和湿度，从而干燥实验物料的节能干燥实验设备。具有能耗小、可靠性高、操作简便等特点。热泵干燥温度控制在5~40℃时的干燥方式称为热泵式冷风干燥，简称冷风干燥。由于物料干燥时环境温度较低，该加工方法克服了热风干燥营养成分损失较大和易出现褐变的缺点，较好地保持制品品质^[14-18]，在水产品、农产品加工方面得到广泛关注。目前鲜见将冷风干燥技术应用于香椿芽干制品生产中的报道。

采用数学模型拟合干燥过程水分变化情况，对研究物料干燥行为，指导工业生产有着重要的意义。虽然常用经验模型能够简单方便地模拟出物料的干燥过程，但缺乏物理意义^[19]。Weibull函数模型具有适用性广、覆盖性强的特点，通过分析Weibull函数中的尺度参数(α)和形状参数(β)，能够掌握整个干燥过程中的水分迁移机制^[20]。

研究采用冷风干燥处理高水分新鲜香椿芽，利用Weibull函数模型对整个干燥过程进行拟合分析，测定了香椿芽冷风干燥过程中的品质指标，并以热风干燥和真空冷冻干燥为对照，对比研究较优冷风干燥参数条件下香椿芽干制品的品质，以期冷风干燥在香椿芽干制品工业生产中的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

香椿芽采摘于洛阳炎居食品科技有限公司实验基地，采摘时挑选外形完整，颜色均匀的香椿芽，清洗沥干后于4℃冷藏。采用105℃烘箱法测得新鲜香椿芽初始干基含水率为4.31 g/g。

1.2 仪器与设备

LFGZX-3型冷风干燥机 浙江湖州欧胜电器有限

公司；JA-B/N系列电子天平、UV754N型紫外-可见分光光度计 上海佑科仪表有限公司；101型电热鼓风干燥箱 北京科伟永兴仪器有限公司；TDZ5-WS离心机 上海右一仪器有限公司；BCD-565WT/B型蔬菜保鲜柜 海信科龙电器股份有限公司；SJIA-10N真空冷冻干燥机 宁波市双嘉仪器有限公司；电度表 上海华立仪表有限公司。

1.3 方法

干燥实验前，参考周建梅^[21]和王明艳^[22]等的方法将香椿芽置于95℃、1 g/100 mL碳酸钠的水中漂烫1 min以保持香椿芽良好的色泽，漂烫后的香椿芽放入水温为(5.0±0.5)℃的蒸馏水冷却池中冷却，沥干后均匀平铺于60 cm×60 cm宽带网盖的多孔物料托盘中（每盘放入500 g香椿芽），置于干燥机内进行各干燥实验。实验过程中每隔0.5 h将物料托盘取出称质量，记录数据后迅速放回继续干燥，直至物料质量不变（前后2次称量质量差值小于0.02 g）时停止干燥。各干燥实验设置3组平行，取平均值进行统计分析。

1.3.1 冷风干燥

根据前期预实验并参考林永茂^[23]的蔬菜及食用菌冷风干燥研究，设计如下冷风干燥条件：1）固定进口风速、装载厚度分别为2 m/s、4.5 mm，改变干燥温度为10、20、30℃；2）固定干燥温度、进口风速分别为20℃、2 m/s，改变装载厚度为3.0、4.5、6.0 mm；3）固定干燥温度、装载厚度分别为20℃、4.5 mm，改变进口风速为1、2、3 m/s。

1.3.2 热风干燥

参考李湘利^[24]和张贝贝^[25]等的方法，采取最佳干燥工艺进行对比实验，即取3组经预处理的香椿芽，每组称质量500 g，铺成薄层，在热风干燥温度为60℃，风速为1.5 m/s的条件下进行干燥，直至干燥完成。同样各干燥实验设置3组平行，取平均值进行统计分析。

1.3.3 真空冷冻干燥

参考冯骏等^[26]的方法，将盛装预处理后香椿芽的浅盘放入冰箱冷冻室预冻，物料预冻度必需低于制品的共晶点温度（香椿的共晶点温度为-8~-12℃）。在制品达快到预冻温度时，先开启搁板制冷，当搁板温度低于-35℃时，将装有预冻后的香椿芽的浅盘放入干燥箱。然后开启冷凝器制冷，当冷凝器温度低于-35℃时再启动真空泵对干燥箱抽真空，热偶计指示值为50 Pa时，关闭冻干箱制冷系统，提供升华热，保持产品在共晶点以下升华干燥，提供足够的相变热，冰升华为水蒸气。

升华干燥分为2个阶段：第一阶段是在制品共晶点温度以下加热，使制品中的水分从固态直接升华为气态，此阶段可除去制品中95%的水分；第二阶段是在制

品共晶点温度以上加热, 由于是去除制品的结构水, 所以需要更多的热量才能让水分子挣脱制品组织的束缚, 于是制品温度逐渐上升。制品温度逐渐接近搁板温度时, 表明制品真空冷冻干燥结束, 本实验搁板最终加热温度40℃。同样各干燥实验设置3组平行, 取平均值进行统计分析。

1.3.4 干燥过程中物料干基含水率的计算

香椿芽干燥过程中干基含水率按式(1)计算。

$$M_l(\text{g/g}) = \frac{m_t - m_d}{m_d} \quad (1)$$

式中: m_t 为干燥任意 t 时刻香椿芽的质量/g; m_d 为绝干物质质量/g。

1.3.5 Weibull函数模型参数计算

干燥过程中香椿芽水分比(moisture ratio, MR)计算公式^[27]为:

$$\text{MR} = \frac{M_t}{M_0} \quad (2)$$

式中: M_0 为香椿芽初始干基含水率/(g/g); M_t 为在任意干燥 t 时刻的干基含水率/(g/g)。

在香椿芽各干燥过程中, 水分比的变化动力学模型采用Weibull函数表示:

$$\text{MR} = \exp\left[-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^\beta\right] \quad (3)$$

式中: MR为水分比; α 为尺度参数/h, 约等于干燥过程中物料脱去63%水分含量所需要的时间; β 为形状参数, 其值与干燥过程开始时的干燥速率有关, 能够反映出干燥过程中水分的扩散机制; 当 $\beta > 1$ 时, 干燥速率会先升高后降低; 当 $0.3 < \beta < 1$ 时, 为降速干燥, 干燥过程由内部水分扩散控制; t 为干燥时间/h。

模型函数拟合精度验证采用决定系数 R^2 和离差平方和(χ^2)来表示。 R^2 值越大、 χ^2 值越小拟合越好。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [\text{MR}_{pi} - \text{MR}_i]^2}{\sum_{i=1}^N [\text{MR}_{pi} - \text{MR}_i]^2} \quad (4)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N [\text{MR}_i - \text{MR}_{pi}]^2}{N - n} \quad (5)$$

式中: N 为实验点数; n 为因素水平个数; MR_i 为实测水分比; MR_{pi} 为预测水分比。

1.3.6 有效水分扩散系数 D_{eff} 计算

系数能够清楚地表示出物料干燥过程中传热传质行为的变化情况, 其值可由Fick第二扩散定律精简式计算得出, 见式(6)。

$$\text{MR} = \frac{8}{\pi^2} - \exp\left(-\frac{\pi^2 D_{\text{eff}}}{4L^2} t\right) \quad (6)$$

式中: D_{eff} 为有效水分扩散系数/(m^2/s); L 为物料厚度的一半/m(本实验中约为0.0005 m); t 为时间/s; M_0 为初始干基含水率/(g/g); M_t 为在任意干燥 t 时刻的干基含水率/(g/g)。

为方便 D_{eff} 的求解, 对式(6)两端取自然对数得:

$$\ln \text{MR} = \ln \frac{8}{\pi^2} - \frac{\pi^2 D_{\text{eff}} t}{4L^2} \quad (7)$$

由式(7)可以看出, $\ln \text{MR}$ 与 t 呈线性关系, 于是可通过对干燥过程中 $\ln \text{MR}$ 与 t 之间的关系进行线性拟合, 求出其斜率, 从而计算 D_{eff} 。

1.3.7 干燥能耗测定

以去除1 kg物料水分需要消耗的能量来表征香椿芽干燥能耗/(kJ/kg); 干燥消耗总能量使用电度表测定。

1.3.8 叶绿素含量测定

利用分光光度计测定香椿芽的叶绿素含量^[28], 准确称量干燥后的香椿芽粉末0.50 g, 置于5.0 mL离心管中, 加入3.0 mL 95%的乙醇, 在室温条件下浸泡12 h后, 3 000 r/min离心3 min。用移液枪准确移取150.0 μL 上层清液, 95%的乙醇定容至10.0 mL棕色容量瓶中, 摇匀后, 在400.0~800.0 nm范围内进行光谱扫描, 读取663.0、645.0 nm波长处的吸光度, 根据经验公式(8)~(10)^[29]可分别计算出芽叶绿素a、叶绿素b和总叶绿素的含量/(mg/100 g)。

$$\text{叶绿素a含量 } C_a = 12.7A_{663 \text{ nm}} - 2.69A_{645 \text{ nm}} \quad (8)$$

$$\text{叶绿素b含量 } C_b = 22.9A_{645 \text{ nm}} - 4.68A_{663 \text{ nm}} \quad (9)$$

$$\text{叶绿素总含量 } C_{\text{总}} = C_a + C_b \quad (10)$$

1.3.9 VC含量测定

VC含量采用2,6-二氯酚靛酚法测定^[30]。称取干燥的香椿芽5 g于研钵中, 加入5 mL、2 g/100 mL的草酸溶液研磨成匀浆, 浆状样品转入100 mL容量瓶后用2%的草酸定容。吸取10 mL滤液放入50 mL锥形瓶中, 用已标定过的2,6-二氯酚靛酚溶液滴定, 直至溶液呈粉红色15 s不褪色为止。同时做空白实验。VC含量按公式(11)计算。

$$\text{VC} = \frac{(V - V_0) \times \rho \times N}{m_0} \times 100 \quad (11)$$

式中: V 为滴定样液时消耗染料溶液的体积/mL; V_0 为滴定空白时消耗染料溶液的体积/mL; ρ 为2,6-二氯酚靛酚染料滴定质量浓度/(mg/mL); N 为稀释倍数; m_0 为样品质量/g。

1.3.10 复水率的测定

将不同干燥方式和干燥条件下得到的香椿芽干制品放入水浴锅内, 60℃水浴0.5 h。水浴加热过程中, 不断搅拌以防止样品吸水不充分。水浴结束后, 快速将样品放在室

温条件下沥干7 min,并用滤纸将样品表面水分擦干。复水率(rehydration ratio, RR)按公式(12)计算^[31-32]。

$$RR/\% = \frac{m_{\text{fl}}}{m} \times 100 \quad (12)$$

式中: m 为样品复水前的质量/g; m_{fl} 为样品复水后的质量/g。

1.3.11 加权综合评分方法

对指标数据进行归一化处理,以使实验数据具有统一性。采用式(13)、(14)分别对实验正向指标值(叶绿素含量、VC含量、复水率)和负向指标值(干燥时间、干燥能耗)进行归一化处理。

$$y_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (13)$$

$$y_i = \frac{x_{\max} - x_i}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (14)$$

式中: y_i 为归一化值; x_i 为指标真实值; x_{\min} 、 x_{\max} 分别为指标最小值和最大值。

采用式(15)对各指标进行综合评分:

$$K = y_1 l_1 + y_2 l_2 + y_3 l_3 + y_4 l_4 + y_5 l_5 \quad (15)$$

式中: y_1 、 y_2 、 y_3 、 y_4 、 y_5 分别为干燥时间、干燥能耗、香椿芽叶绿素总含量、VC含量、复水率归一化值; l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 、 l_5 分别其对应的权重,由层次分析法^[33]可得 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 、 l_5 对应的值分别为0.15、0.25、0.20、0.20、0.20。

1.4 统计分析

Weibull模型拟合采用Datafit 9.0软件的自定义非线性函数拟合功能拟合,方差分析采用DPS 7.05软件。每项实验重复3次,取其平均值进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同干燥条件对香椿芽冷风干燥特性的影响

2.1.1 干燥曲线

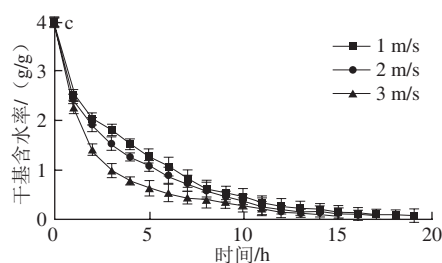
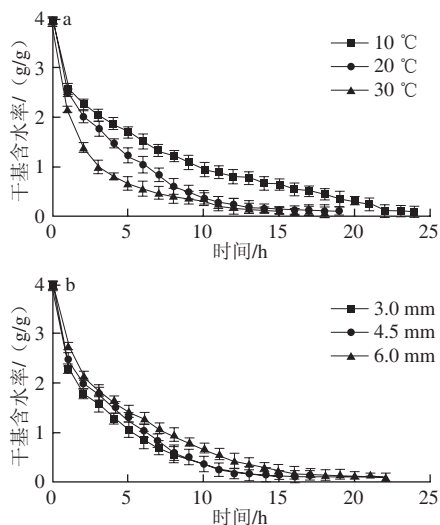


图1 不同干燥温度(a)、装载厚度(b)和进口风速(c)条件下香椿芽冷风干燥曲线

Fig. 1 Drying curves of *Toona sinensis* under different drying conditions

由图1可知,干燥温度、装载厚度及进口风速均对干燥时间有着显著的影响($P < 0.05$)。当固定装载厚度和进口风速,改变干燥温度为10、20、30 °C时,香椿芽冷风干燥时间分别为24、19、15 h,干燥时间最小值比最大值减少了37.50%,说明增加干燥温度能够显著缩短干燥耗时($P < 0.05$),这是因为提升干燥温度能够增大干燥介质与物料之间的温度梯度及蒸汽分压差,强化物料干燥传热传质行为,从而促进水分的扩散及蒸发,提升干燥速率,缩短干燥时间;当固定干燥温度和进口风速,改变装载厚度为3.0、4.5、6.0 mm时,香椿芽冷风干燥时间分别为17、19、22 h,干燥时间最小值比最大值减少了22.72%,这表明减小物料装载厚度能够缩短干燥时间,因为,减少装载厚度能够缩短干燥介质同物料间的质热传递路径,缩减干燥时间;当固定干燥温度和装载厚度,改变进口风速为1、2、3 m/s时,香椿芽冷风干燥时间分别为20、19、15 h;干燥时间最小值比最大值减少了25%,这意味着增加进口风速能够缩短干燥时间,因为增加风速一方面能够扩大物料与干燥介质间的接触面积,强化物料干燥过程中的质热传递,另一方面风速的增加有利于物料表面与空气介质之间的水分交换。通过以上对比分析能够发现,温度对香椿芽冷风干燥时间的影响最大,装载厚度对干燥时间的影响最小。高瑞昌等^[16]在冷风干燥鲢鱼时得到不同干燥条件对鲢鱼水分的影响结果,与本研究结果相似。

2.1.2 D_{eff} 及Weibull分布函数

为进一步深入研究香椿芽冷风干燥行为,采用Weibull分布函数对香椿芽冷风干燥过程中水分比随时间的变化规律进行拟合,其结果如表1所示。拟合函数的决定系数 R^2 均大于0.9,且离差平方和 χ^2 均处于 10^{-4} 水平,表现出较好地拟合性,说明能够采用Weibull分布函数表达香椿芽冷风干燥过程中水分比随时间变化的动力学关系。干燥温度、装载厚度和进口风速对香椿芽冷风干燥的尺度参数 a 均有显著影响($P < 0.05$)。随着干燥温度和进口风速的增加,尺度参数 a 在不断减小;然而,随着装载厚度的增加,尺度参数 a 在不断增大。不同干燥

温度、装载厚度和进口风速条件下香椿芽冷风干燥的尺度参数 α 的最大值比最小值分别增加了95.58%、22.67%和41.20%，表明不同干燥条件对尺度参数的影响由大到小为：温度>风速>装载厚度，即物料除去63%水分所消耗的时间受干燥温度的影响最大，受装载厚度的影响最小。

Weibull分布函数形状参数 β 能够解释干燥过程中物料水分的迁徙机理，由表1可知，不同干燥条件下香椿芽形状参数 β 值均小于1，这说明香椿芽冷风干燥过程为降速干燥。物料干燥过程中水分先有物料内部迁移至物料表面，再由物料表面蒸发至干燥环境，不同干燥条件下香椿芽形状参数 β 值表明，香椿芽冷风干燥过程中物料内部水分扩散速率小于物料表面水分蒸发速率，整个干燥过程主要受内部水分扩散控制，且由于物料干燥过程中含水率不断降低，物料内外水势差也在不断的减小，物料内部水分扩散至表面的速率也随之降低，整个干燥处于降速干燥阶段。方差分析发现，不同干燥温度、装载厚度和进口风速条件下香椿芽形状参数 β 值的变化不显著（ $P>0.05$ ），表明香椿芽冷风干燥过程中的水分迁移机制不会随冷风干燥条件的改变而变化。

表1 不同干燥条件下香椿芽冷风干燥 D_{eff} 及Weibull分布函数拟合参数
Table 1 D_{eff} values and fitting parameters, fitting precision indexes of Weibull distribution function for *Toona sinensis* under different drying conditions

干燥条件	$D_{\text{eff}}/(\times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s})$	Weibull分布函数拟合参数			
		α	β	R^2	$\chi^2 (\times 10^{-4})$
2 m/s、 4.5 mm	10 °C	6.272	0.832	0.995	9.010
	20 °C	8.553	0.856	0.984	8.333
	30 °C	9.637	0.807	0.991	9.354
20 °C、 2 m/s	3.0 mm	9.045	0.851	0.905	8.690
	4.5 mm	8.533	0.856	0.998	7.691
	6.0 mm	7.963	0.791	0.995	6.868
20 °C、 4.5 mm	1.0 m/s	6.629	0.854	0.981	9.024
	2.0 m/s	8.553	0.856	0.927	9.232
	3.0 m/s	8.967	0.813	0.951	9.977

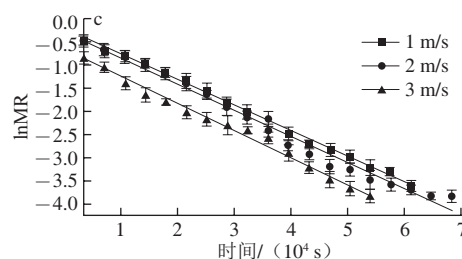
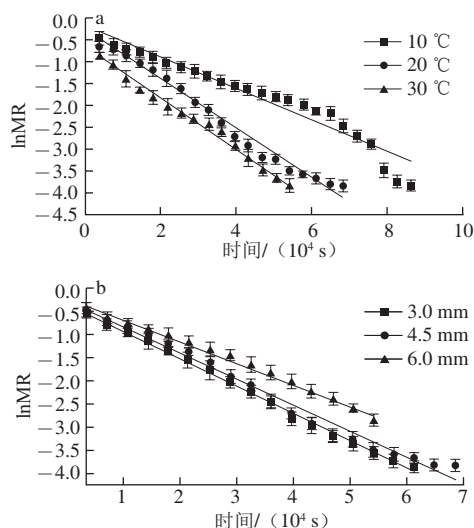


图2 不同干燥温度(a)、装载厚度(b)和进口风速(c)条件下香椿芽lnMR与时间之间的关系

Fig. 2 Plots of lnMR vs drying time of *Toona sinensis* under different drying conditions

D_{eff} 是表征干燥过程中物料干燥特性的重要参数。由Weibull分布函数分析过程可知，香椿芽冷风干燥始终处于降速干燥阶段，因此能够采用Fick第二扩散定律计算其干燥过程中的 D_{eff} 。图2给出了不同干燥条件下物料lnMR同干燥时间的变化规律，结合图2和式(7)可得到香椿芽冷风干燥过程中的 D_{eff} ，其结果见表1。不同干燥条件下，香椿芽冷风干燥 D_{eff} 在 $(6.272 \sim 9.637) \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 之间，均属于 10^{-9} 数量级，这符合一般食品原料干燥 D_{eff} 在 $10^{-12} \sim 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 的范围^[34]。香椿芽冷风干燥过程中，随着干燥温度的升高，干燥过程中热效应在不断加强，增强物料内部水分的扩散以及物料表面水分蒸发的促进作用，最终导致物料干燥过程中 D_{eff} 的提高。这一结果同巨浩羽等^[19]对胡萝卜片降湿热风干燥的结果一致。相反，随着物料堆积厚度的增加，香椿芽 D_{eff} 在不断降低，因为物料堆积厚度增加，阻碍了热向物料内部的传递，增加了被遮挡部分物料水分蒸发的阻力。增大进口风速能够加快物料同干燥环境之间的湿热交换速率，从而增加物料内外水势差和温度差，促进物料水分迁移，提高物料 D_{eff} 。进一步对比分析表1中不同干燥条件下香椿芽冷风干燥 D_{eff} 发现，不同温度、装在厚度、进口风速条件下香椿芽 D_{eff} 的最大值比最小值分别增加了53.65%、13.59%和35.27%，结合方差分析可知，温度和风速对香椿芽冷风干燥过程中 D_{eff} 影响显著（ $P<0.05$ ），不同干燥条件对 D_{eff} 的影响大小遵循：温度>风速>装载厚度的影响规律。

2.2 不同干燥条件对香椿芽冷风干燥品质特性的影响

由表2可知，固定进口风速和装载厚度，香椿芽干制品叶绿素含量随干燥温度的升高而增加，最大值比最小值增加了7.36%。李湘利等^[24]在研究热风与微波及其联合干燥对香椿芽品质的影响时发现，随着干燥温度的增加叶绿素含量在不断降低，与本研究结果相反，这是因为，叶绿素分解受温度和降解时长两方面因素影响，冷风干燥温度相对于热风干燥较低，降解时长成为控制叶绿素含量的主要因素，随着干燥温度的升高干燥时间逐渐缩短，叶绿素分解时间也随之缩短，从而其含量随着干燥温度的升高而增加。同理，增加物料装载厚度和降

低进口风速会延长香椿芽干燥耗时,从而导致叶绿素分解量增加,含量降低。不同物料装载厚度和进口风速条件下香椿芽叶绿素总含量最高值比最低值分别增加了8.26%和14.02%。由以上分析能够发现,在实验采用的干燥条件范围内,不同干燥条件对香椿芽干制品叶绿素总含量影响遵循:风速>装载厚度>干燥温度的规律。

表2 冷风干燥温度对香椿芽品质的影响
Table 2 Effect of cold air drying temperature on the quality of *Toona sinensis*

干燥条件		干燥 时间/h	干燥能耗/ (kJ/kg)	叶绿素总含量/ (mg/100 g)	VC含量/ (mg/100 g)	复水率/%	综合 评分
2 m/s、 4.5mm	10℃	24	95 040±840 ^a	2.31±0.024 ^a	22.54±0.043 ^a	4.93±0.042 ^a	0.25±0.032 ^a
	20℃	19	75 240±760 ^b	2.46±0.029 ^a	21.72±0.035 ^a	4.74±0.015 ^a	0.30±0.035 ^a
	30℃	15	63 360±640 ^c	2.48±0.033 ^a	20.04±0.038 ^b	3.41±0.031 ^c	0.33±0.027 ^a
20 ℃、 2 m/s	3.0mm	17	65 340±660 ^a	2.49±0.051 ^a	22.63±0.019 ^b	4.38±0.044 ^b	0.40±0.027 ^b
	4.5mm	19	75 240±760 ^b	2.46±0.029 ^a	21.72±0.035 ^a	4.74±0.015 ^a	0.30±0.035 ^a
	6.0mm	22	95 040±1040 ^b	2.30±0.024 ^a	19.35±0.022 ^c	4.80±0.023 ^a	0.17±0.032 ^c
20 ℃、 4.5 mm	1.0m/s	20	83 160±950 ^a	2.21±0.019 ^c	19.20±0.031 ^d	4.83±0.036 ^a	0.26±0.027 ^b
	2.0m/s	19	75 240±760 ^b	2.46±0.029 ^a	21.72±0.035 ^a	4.74±0.015 ^a	0.30±0.035 ^a
	3.0m/s	15	67 320±700 ^c	2.52±0.043 ^b	22.42±0.038 ^b	4.19±0.035 ^d	0.31±0.028 ^a

注:同列肩标小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。

由表2中不同干燥条件下香椿芽VC含量变化情况能够发现随着干燥温度的升高,香椿芽VC含量在不断的减少,VC含量最高值比最低值增加了12.48%,这是因为VC为热敏性营养成分,随着温度提升,VC降解加快。固定干燥温度,随着物料装载厚度的增加和进口风速的减小香椿芽VC含量不断降低,因为增加物料装载厚度以及减小进口风速延长了香椿芽冷风干燥耗时,VC降解时间也随之延长,从而含量降低;不同装载厚度和进口风速条件下VC含量的最大值比最小值分别增加了16.95%和16.77%。对比不同干燥条件对VC含量的影响发现,在实验采用的干燥条件范围内,温度对其的影响程度最小,装载厚度和进口风速对其的影响程度大致相同。

干制品复水比是反映物料干燥过程中结构破坏程度大小的重要指标,由表2可知,不同温度、装载厚度及进口风速条件下香椿芽复水比最大值比最小值分别增加了44.54%、9.59%、16.11%,在实验采用的干燥条件范围内其影响程度大小遵循:干燥温度>风速>装载厚度的规律,与不同干燥条件对香椿芽冷风干燥有效水分扩散系数的影响规律一致。物料干燥过程中内部结构的破坏主要是由水分迁移形成的剪切应力引起的,干燥速率越快,产生的应力就越大,破坏程度就越高,因此香椿芽复水率受干燥温度影响最大。以干燥时间、干燥能耗、叶绿素含量、VC含量以及复水率为指标对不同条件下香椿芽冷风干燥过程进行加权综合评价,结果如表2所示,干燥温度、装载厚度和进口风速分别为20℃、3.0 mm, 2 m/s条件下香椿芽冷风干燥的综合评分值最高为0.40,实验范围内,该条件较适合应用于香椿芽的冷风干燥。

2.3 香椿芽不同干燥方式对比研究

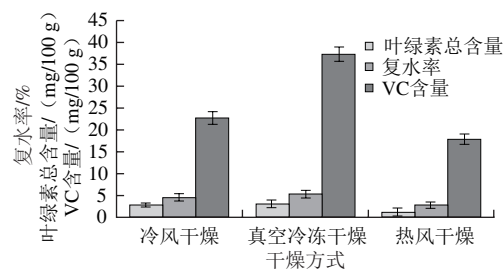


图3 不同干燥方式条件下香椿芽品质指标结果
Fig. 3 Quality indexes of *Toona sinensis* under different drying methods

不同干燥方式条件下(冷风干燥、真空冷冻干燥、热风干燥),香椿芽叶绿素总含量、复水率及VC含量结果如图3所示。对比发现,真空冷冻干燥得到的香椿芽干制品的各品质指标值均高于冷风干燥和热风干燥。这是因为真空冷冻干燥过程中,物料大部分时间处于升华干燥状态,而升华干燥比蒸发干燥能够更好地保护产品品质,物料热风干燥过程中,由于其内部水分扩散速率小于表面水分蒸发速率,且热风干燥温度较高,最终导致热量在物料表面过度积累,造成物料表面过热现象发生,严重影响产品品质^[35]。真空冷冻干燥香椿芽叶绿素总含量、复水率及VC含量比冷风干燥相应指标值分别增加了16.86%、20.31%和64.87%;比热风干燥相应指标分别增加了200.00%、101.14%和109.48%,这一现象表明,相对于热风干燥而言,冷风干燥产品品质更接近真空冷冻干燥产品的品质。

3 结论

通过对香椿芽冷风干燥研究可知,干燥温度、物料堆积厚度和进口风速对干燥耗时均有显著影响($P < 0.05$),提升干燥温度和进口风速以及减少物料堆积厚度能够减少香椿芽冷风干燥耗时。Weibull分布函数能够准确拟合干燥过程中香椿芽水分比随时间的变化规律,香椿芽冷风干燥过程为降速干燥,干燥速率主要受内部水分扩散控制。利用Fick第二定律计算得到的香椿芽冷风干燥 D_{eff} 在 $(6.272 \sim 9.637) \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 之间,均属于 10^{-9} 数量级。当干燥温度、装载厚度和进口风速分别为20℃、3.0 mm, 2 m/s时,香椿芽冷风干燥的综合评分值最高实验范围内,该条件较适合应用于香椿芽的冷风干燥中。通过与热风干燥和真空冷冻干燥对比发现,较优冷风干燥条件下得到的香椿芽干制品品质高于热风干燥得到的香椿芽产品品质,接近真空冷冻干燥得到的香椿芽干制品品质。

参考文献:

- [1] 国家中医药管理局中华本草编委会. 中华本草[M]. 上海: 上海科技出版社, 1999: 47.
- [2] 周翔宇. 中国香椿属的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2005: 26-39.
- [3] YU W J, CHANG C C, KUO T F, et al. *Toona sinensis* Roem leaf extracts improve antioxidant activity in the liver of rats under oxidative stress[J]. Food and Chemical Toxicology, 2012, 50(6): 1860-1865. DOI:10.1016/j.fct.2012.03.068.
- [4] YANG H L, CHEN S C, LIN K Y, et al. Antioxidant activities of aqueous leaf extracts of *Toona sinensis* on free radical-induced endothelial cell damage[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2011, 137(1): 669-680. DOI:10.1016/j.jep.2011.06.017.
- [5] 马秋香. 香椿的加工和栽培技术[J]. 农产品加工(学刊), 2005, 42(8): 70-71. DOI:10.3969/j.issn.1671-9646-B.2005.08.023.
- [6] 刘静, 李湘利, 孔娟, 等. 超声波协同酶法提取香椿老芽可溶性膳食纤维的工艺优化[J]. 食品科学, 2014, 35(12): 41-45. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201412008.
- [7] 张京芳, 王冬梅, 刘鑫, 等. 干制香椿褐变的控制研究[J]. 中国食品学报, 2009, 9(2): 144-148. DOI:10.3969/j.issn.1009-7848.2009.02.025.
- [8] 赵美香, 侯华铭, 崔清亮, 等. 不同干燥方法对香椿苗芽菜品质的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2014, 34(1): 84-87. DOI:10.13842/j.cnki.issn1671-8151.2014.01.019.
- [9] 赵昆, 赵士杰, 滕竹竹. 香菜热风干燥的试验研究[J]. 农机化研究, 2016, 38(5): 250-254. DOI:10.3969/j.issn.1003-188X.2016.05.051.
- [10] 郑清云, 王丹, 马越, 等. 热风干燥温度对青椒品质的影响[J]. 食品与机械, 2015, 31(3): 158-161. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2015.03.037.
- [11] 聂波, 张国治, 王安建, 等. 胡萝卜热风干燥特性及其品质的研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2015, 36(4): 80-84. DOI:10.16433/j.cnki.issn1673-2383.2015.04.037.
- [12] 吴中华, 李文丽, 赵丽娟, 等. 枸杞分段式变温热风干燥特性及干燥品质[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 287-293. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2015.11.041.
- [13] 乔晓玲, 闫祝炜, 张原飞, 等. 食品真空冷冻干燥技术研究进展[J]. 食品科学, 2008, 29(5): 469-474. DOI:10.3321/j.issn.1002-6630.2008.05.107.
- [14] 张国琛, 毛志怀. 水产品干燥技术的研究进展[J]. 农业工程学报, 2004, 20(4): 297-300. DOI:10.3321/j.issn.1002-6819.2004.04.070.
- [15] 郑海波, 江美都, 傅玉颖, 等. 低温低湿条件下海鳗冷风干燥动力学特性[J]. 中国食品学报, 2012, 12(2): 73-80. DOI:10.3969/j.issn.1009-7848.2012.02.012.
- [16] 高瑞昌, 袁丽, 刘伟民, 等. 热泵冷风干燥鲢鱼的挥发性盐基氮和脂质氧化品质模型[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 227-232. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2013.23.031.
- [17] 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. DOI:10.3969/j.issn.1005-0329.2015.06.017.
- [18] 王延辉, 杨文鸽, 徐培芳. 干燥条件对鳗鲡风味成分的影响[J]. 食品科学, 2012, 33(2): 11-15.
- [19] 巨浩羽, 肖红伟, 郑霞, 等. 干燥介质相对湿度对胡萝卜片热风干燥特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 296-304. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.040.
- [20] 张卫鹏, 高振江, 肖红伟, 等. 基于Weibull函数不同干燥方式下的茯苓干燥特性[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 317-324. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2015.05.044.
- [21] 周建梅, 王承南, 刘斌, 等. 香椿芽的速冻保鲜与脱水加工技术[J]. 经济林研究, 2011, 29(2): 101-103. DOI:10.3969/j.issn.1003-8981.2011.02.017.
- [22] 王明艳, 张小杰, 王涛, 等. 响应面法优化香椿叶多糖的提取条件[J]. 食品科学, 2010, 31(4): 106-110.
- [23] 林永茂. 蔬菜及食用菌的冷风干燥工艺: CN101301001[P]. 2011-04-20.
- [24] 李湘利, 刘静, 肖鲜. 热风与微波及其联合干燥对香椿芽品质的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(18): 64-68. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201518011.
- [25] 张贝贝. 加工处理对脱水香椿品质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015: 48-49.
- [26] 冯骏, 刘佳, 李娟, 等. 香椿芽真空冷冻干燥工艺及其机理研究[J]. 农产品加工(综合刊), 2011, 7(9): 76-78. DOI:10.3969/j.issn.1671-9646-C.2011.09.049.
- [27] MIDILLI A. Determination of pistachio drying behaviour and conditions in solar drying system[J]. International Journal of Energy Research, 2001, 25(8): 715-725.
- [28] 崔建升, 吕鹏翼. 分光光度法测定水体中叶绿素a的浓缩方法的改进[J]. 理化检验(化学分册), 2015, 51(1): 105-107.
- [29] 谢宇奇, 林翠梧, 赖清华, 等. 紫外-可见吸收光谱法测定芒果叶中的芒果苷和叶绿素[J]. 南方农业学报, 2014, 45(3): 463-468. DOI:10.3969/j.issn.2095-1191.2014.3.463.
- [30] ZHANG M, LI C L, DING X L. Effects of heating conditions on the thermal denaturation of button mushroom suitable for dehydration[J]. Drying Technology, 2005, 23(5): 1119-1125.
- [31] 王向阳, 蔡政军. 青菜脱水工艺复水研究[J]. 食品科学, 2001, 22(6): 46-48. DOI:10.3321/j.issn.1002-6630.2001.06.011.
- [32] 苏倩倩, 陈贵堂, 裴斐, 等. 不同干燥方式对香菇品质及甲醛含量的影响[J]. 食品科学, 2015, 36(17): 33-38. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201517007.
- [33] MUKHOPADHYAY S, MAJUMDAR G C, KGOSWAMI T. Fuzzy logic (similarity analysis) approach for sensory evaluation of *chhana podo*[J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 53(1): 204-210. DOI:10.1016/j.lwt.2013.01.013.
- [34] 刘云宏, 苗帅, 罗磊, 等. 基于威布尔分布函数的金银花气调干燥实验研究[J]. 食品科学, 2014, 35(21): 31-35. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201421007.
- [35] 唐秋实, 刘学铭, 池建伟, 等. 不同干燥工艺对杏鲍菇品质和挥发性风味成分的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(4): 25-30. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201604005.