

红芸豆浸泡过程中吸水特性及吸水动力学变化

武彦春¹, 王立东^{1,2*}

(1. 黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江大庆 163319) (2. 国家杂粮工程技术研究中心, 黑龙江大庆 163319)

摘要: 为探讨红芸豆籽粒在浸泡过程中温度、时间等条件对其吸水特性及水分子动态变化的影响, 采用低场核磁共振技术 (LF-NMR)、Peleg 模型、质构分析技术和核磁共振成像技术 (MRI) 等分析了浸泡后红芸豆吸水率、硬度、体积膨胀率、Peleg 常数、弛豫时间、水分分布的变化。结果表明, 红芸豆吸水率随着浸泡温度的升高, 平衡所需时间缩短, 硬度在吸水前 2 h 快速下降, 降低至最低点后逐渐上升至稳定状态; 体积膨胀率随温度的升高而增加, 与吸水率呈正相关性。Peleg 方程模拟获得相对误差 E 均小于 10%, 证明模型可靠, 常数 K_1 随温度的升高呈下降趋势; 红芸豆浸泡过程中出现三种状态的水 (结合水、游离水、弱结合水), 含量随着温度的升高先增加后平衡, 且温度越高, 达到平衡时间越短; 确定最佳浸泡温度为 45 °C, 浸泡时间为 4 h, 浸泡后红芸豆的水分含量为 56.61%, 硬度 57.80N, 体积膨胀率 122.22%。研究结果为红芸豆经浸泡工艺的加工利用提供一定依据及参考。

关键词: 红芸豆; 浸泡条件; 吸水特性; 吸水动力学

文章编号: 1673-9078(2025)05-147-154

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.5.0282

Changes in Water Absorption Characteristics and Kinetics of Red Kidney Beans during Soaking

WU Yanchun¹, WANG Lidong^{1,2*}

(1. College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

(2. Department of National Coarse Cereals Engineering Research Center, Daqing 163319, China)

Abstract: Red kidney beans were soaked at different temperatures for different durations to determine the effects of several factors on their water absorption characteristics and kinetics. Low-field nuclear magnetic resonance, Peleg modeling, texture profile analysis, and magnetic resonance imaging were used to analyze changes in the water absorption rate, hardness, volume expansion, Peleg constants, relaxation time, and water distribution of red kidney beans after soaking. The results showed that increasing the soaking temperature increased the water absorption rate of red kidney beans, thereby shortening the time to reach equilibrium. The hardness rapidly decreased in the first 2 h of soaking and slowly increased to a stable state after reaching a minimum. Volume expansion increased with temperature and was positively correlated with the water absorption rate. The relative error of the results simulated by the Peleg model was within 10%, demonstrating the reliability

引文格式:

武彦春, 王立东. 红芸豆浸泡过程中吸水特性及吸水动力学变化[J]. 现代食品科技, 2025, 41(5): 147-154.

WU Yanchun, WANG Lidong. Changes in water absorption characteristics and kinetics of red kidney beans during soaking [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(5): 147-154.

收稿日期: 2024-03-08

基金项目: 黑龙江省杂粮生产与加工优势特色学科项目 (2022-78); 黑龙江省“双一流”学科协同创新成果项目 (LJGXCG2024-P38); 大庆市指导性科技计划项目 (zd-2024-45)

作者简介: 武彦春 (1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 粮食、油脂及植物蛋白工程, E-mail: 15776596151@163.com

通讯作者: 王立东 (1978-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 淀粉资源的深加工与利用及谷物健康食品的研究与开发, E-mail: wanglidong-521@163.com

of the model. K_1 showed a decreasing trend with increasing temperature. During soaking, three forms of water (bound water, free water, and weakly bound water) were observed in red kidney beans. At the optimal soaking temperature (45 °C) and time (4 h), the soaked red kidney beans had a moisture content of 56.61%, hardness of 57.80 N, and volume expansion of 122.22%. These results provide a reference for the processing and utilization of soaked red kidney beans.

Key words: red kidney bean, soaking condition, water absorption property; water absorption kinetics

芸豆 (*Phaseolus vulgaris* L.), 豆科 (Leguminosae) 菜豆属 (*Phaseolus* L.), 常见有红芸豆、花芸豆、黑芸豆等^[1]。红芸豆营养丰富, 富含蛋白质、酚类、矿物质、维生素和碳水化合物等^[2,3], 具有低钠、高钾、高镁等特点^[4]。红芸豆中富含人体所必须的氨基酸, 且优于大豆蛋白, 是人类优质蛋白质来源^[5]。红芸豆中含有丰富的叶酸, 适合心脏病人群食用。同时还富含凝集素, 低剂量的凝集素对消化系统、免疫系统和内分泌系统有益处^[6]。

红芸豆难于蒸煮, 限制其在人们在日常膳食生活中的使用。因其表皮结构致密, 通常蒸煮前采取浸泡的方式使其软化, 浸泡不仅缩短了蒸煮时间, 同时能够节约能源。在浸泡过程中, 受温度、时间等条件的影响, 产品的感官品质、营养成分等发生一定程度改变, 如长时间浸泡或高温浸泡会导致红芸豆中淀粉、多糖等营养物质的析出^[7,8]。适当浸泡时间和浸泡温度可使红芸豆吸收水分, 减少水溶性物质损失^[9]。因此, 应明确红芸豆在适宜的条件下浸泡, 达到最佳水分含量。Peleg 模型能够预测短时间内浸泡的红芸豆中水分含量, 目前已被广泛应用于黑豆^[10]、大豆^[11]、豌豆^[12]和大米^[13]等谷物的浸泡吸水过程研究。然而, 以红芸豆为原料, 对其浸泡后吸水特性及吸水动力学研究相关报道较少。

本文以红芸豆为原料, 探讨红芸豆籽粒在浸泡过程中温度、时间等条件对其吸水特性及水分子动态变化的影响, 并采用 Peleg 模型、质构分析技术、低场核磁共振技术和核磁共振成像技术等分析了浸泡过程中红芸豆硬度、水分状态、水分分布情况、质子迁移情况和吸水特性的变化。本研究在一定程度上有助于解决红芸豆加工质量问题, 也为其它豆类在食品加工过程中高效浸泡提供一定的理论依据及参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

红芸豆 [水分含量 8.96%, 千粒重 455 g, 籽粒长 (15.48±1.11) mm, 宽 (7.33±0.38) mm], 黑

龙江惠氏豆业有限公司; MesoMR23-060H-I 核磁共振分析系统, 苏州纽迈分析仪器有限公司; TMS-PRO 食品物性分析仪, 美国 FTC 公司; DZKW-D-2 电热恒温水浴锅, 天津天泰仪器有限公司; AR124CN 电子分析天平, 奥豪斯仪器上海有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 红芸豆浸泡

挑选大小均一、颗粒饱满的红芸豆, 用纯净水清洗红芸豆将其表面杂质去除。准确称取红芸豆样品 10 g, 以料水比为 1:5 (m/m) 比例浸泡, 浸泡温度分别为 25、30、35、40、45 °C, 不同温度下的浸泡时间分别为 1、2、3、4、5、6、7、8 h。浸泡结束后, 沥水并用吸水纸擦干红芸豆表面水分。

1.2.2 红芸豆水分含量测定

水分含量测定方法参照国标 GB5009.3^[14]。

1.2.3 红芸豆吸水率测定

称取红芸豆样品约 10 g (M_1), 置于量筒中加入 50 mL 蒸馏水, 将样品在 25、30、35、40、45 °C 条件下浸泡, 每隔 1 h 取样, 测定浸泡后红芸豆质量 (M_2), 按公式 (1) 计算吸水率^[15]。

$$A = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

A ——红芸豆吸水率, %;

M_1 ——浸泡前红芸豆质量, g;

M_2 ——浸泡后红芸豆质量, g。

1.2.4 红芸豆硬度测定

硬度采用质构分析仪测定。测定探头为 P25R, 测前速度、测中速度和测后速度设置为 1 mm/s, 压缩距离为 30% 形变^[16]。

1.2.5 红芸豆体积膨胀率测定

量取 50 mL 蒸馏水置于 100 mL 量筒中, 称取约 10 g 红芸豆置于量筒中, 测定量筒体积变化 (V_1), 将样品在 25、30、35、40、45 °C 条件下浸泡, 每

隔 1 h 取样,测定量筒中体积变化 (V_2),按公式 (2) 计算体积膨胀率^[17]。

$$R=\frac{V_2-V_1}{V_1}\times100\%$$

(2)

式中:
 R ——红芸豆体积膨胀率, %;
 V_1 ——浸泡前红芸豆体积, mL;
 V_2 ——浸泡后红芸豆体积, mL。

1.2.6 Peleg模型模拟红芸豆浸泡的吸水过程

物质的吸水过程可以用 Peleg 数学模型进行拟合,能够预测物质的水分含量,被广泛的应用于谷物吸水研究,该模型是由学者 PELEG 提出^[18]。

$$M_t=M_0+\frac{t}{K_1+K_2t}$$

(3)

式中:
 M_t ——水分含量, %;
 M_0 ——未浸泡红芸豆水分含量, %;
 t ——时间, h;
 K_1 ——速率常数, h⁻¹;
 K_2 ——容量常数, %⁻¹。

$$\frac{t}{M-M_0}=K_1+K_2t$$

(4)

以 t 为自变量,因变量 $\frac{t}{M-M_0}$, 建立线性方程, 计算 K_1 和 K_2 。

相对误差 (E) 可用于评估 Peleg 方程预测数据的准确性,

$$E=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^n\left|\frac{M_{\text{exp}}-M_{\text{pred}}}{M_{\text{exp}}}\right|\times100$$

(5)

式中:
 E ——相对误差;
 M_{exp} ——实验值;
 M_{pred} ——预测值;
 N ——平行实验次数。

1.2.7 红芸豆低场核磁共振水分状态分析

样品经浸泡后用纸擦干,放置于核磁管中,未处理样品直接放入核磁管中^[19]。多脉冲回波序列 CPMG 参数设置见表 1。

1.2.8 红芸豆核磁共振成像测定

样品浸泡后用纸擦干,将单颗红芸豆颗粒放置于核磁管中进行测试^[20]。核磁共振成像多层自旋回波 SE 设置参数设置见表 2。

表 1 低场核磁共振参数

Table 1 Low field-nuclear magnetic resonance parameters

项目名称	参数	项目名称	参数
序列 SEQ	CPMG	采样带宽 SW	100 kHz
谱仪频率 SF	19 MHz	射频延时 RFD	0.1 ms
重复采样等待时间 TW	3 000 ms	漂移频率 O1	574 617.2 Hz
90° 脉冲宽度 P1	22 us	模拟增益 RG1	20 db
时间点数据 TD	172 498	数字增益 DRG1	3
数据半径 DR	1	重复扫描次数 NS	16
180° 脉冲宽度 P2	45 us	回波个数 NECH	5 000

表 2 核磁共振成像参数

Table 2 Magnetic resonance imaging parameters

项目名称	参数	项目名称	参数
翻转角度 FA	90°	重复时间 TR	400 ms
重新聚焦翻转角度 RFA	180°	回波时间 TE	18.13 ms
模拟增益 RG	20 dB	平均	8
前置放大器增益 PRG	3	读取尺寸 RS	256
数字增益 DRG	5 dB	相尺寸 PS	192
相位编码持续时间 PED	0.50 ms	回波位置 EP	10
采样频率 SW	20	伪扫描 DC	0

1.3 数据处理

采用 WPS Office 对数据进行整理,采用 Origin 2021 软件进行绘图以及线性拟合,采用 SPSS 26 软件进行显著性分析 ($P<0.05$)。核磁共振成像通过伪彩软件 Niumag NMR Imaging System V3.0 进行处理。

2 结果与讨论

2.1 红芸豆浸泡过程中吸水率变化

红芸豆不同浸泡时间和温度条件下吸水率和籽粒变化如图 1 和图 2 所示。可以看出,在相同浸泡时间条件下,吸水率随着温度的升高而增加,45 ℃ 吸水率最快,较 25 ℃ 浸泡达到饱和时间缩短 240 min。在同一温度条件下,随着浸泡时间的延长,吸水率逐渐增加,但增大到一定程度后,吸水速率增加缓慢,且不同温度下红芸豆饱和吸水率相近。在 45 ℃ 浸泡 240 min 条件下,红芸豆即达到饱和吸水率为 109.81%。红芸豆在浸泡过程中,由于温度的升高,种皮破损致使水分快速渗入红芸豆内部,加速水分扩散速率,种皮软化,渗透作用增强,利于红芸豆的吸水膨胀,吸水率增加。随着时间的延长,籽粒内外水分梯度值降低,固形物损失增加

和色素损失，致使吸水速率降低。Miano 等^[21]研究羽扇豆浸泡吸水速率，发现相似的变化规律。

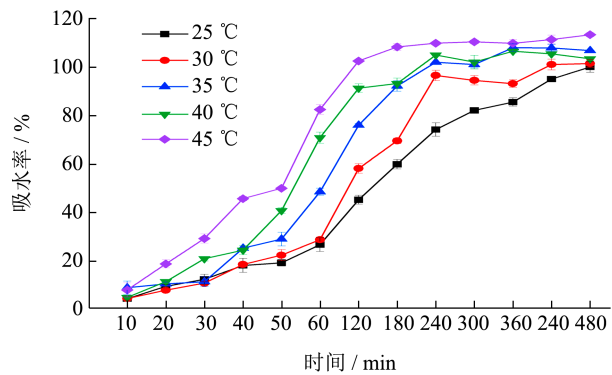


图 1 红芸豆吸水率变化

Fig.1 Change in water absorption of red kidney beans

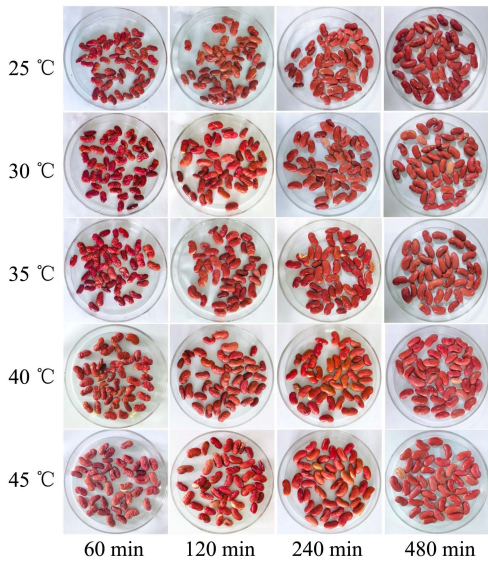


图 2 红芸豆浸泡过程籽粒状态变化

Fig.2 Changes in seed status during soaking of red kidney beans

2.2 红芸豆浸泡过程中硬度变化

红芸豆籽粒不同浸泡时间和温度条件下硬度变化如图 3 所示。可以看出，随着浸泡时间的延长，不同浸泡温度条件下的籽粒硬度呈先减小后增大的趋势，在 2 h 时硬度降低至最低点，温度越高硬度下降越明显，说明温度升高有助于芸豆籽粒的软化。经一段时间浸泡后其硬度增大的原因可能是浸泡前期红芸豆内部自由水增加，使籽粒软化，随着浸泡时间增加，结合水含量升高，水分子与淀粉和蛋白质等大分子物质相结合，硬度增加。在 45 °C 浸泡 4 h 后，芸豆籽粒硬度保持相对稳定状态，结合吸水率变化趋势，可知此时籽粒为饱和吸水率。李鹏^[22]研究黑豆在不同温度和时间条件下浸泡后籽粒

硬度变化，浸泡前 30 min 会导致黑豆硬度下降，温度越高硬度下降越大，在浸泡 5 h 后硬度保持稳定。

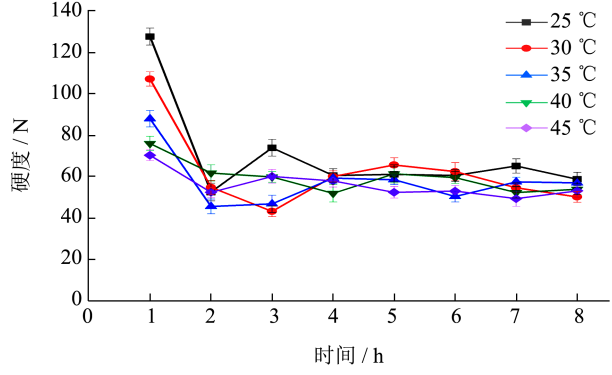


图 3 不同温度和时间浸泡的红芸豆硬度变化

Fig.3 Changes in hardness of red kidney beans soaked at different temperatures and times

2.3 红芸豆浸泡过程中体积膨胀率变化

红芸豆籽粒不同浸泡时间和温度条件下体积膨胀率变化如图 4 所示。可以看出，随着浸泡时间的延长，不同温度浸泡条件下红芸豆籽粒体积膨胀率呈上升趋势，其中在浸泡温度为 35、40、45 °C 时，浸泡 3~4 h 后体积膨胀率达到平衡状态。说明在较高的温度条件下水分子更容易进入籽粒内部，水分子与大分子物质相结合，使体积增大。此结果与吸水率变化趋势一致，表明红芸豆体积膨胀率与吸水率之间呈正相关性，但王大为等^[23]研究绿豆浸泡体积膨胀率变化结果相反，其可能是由红芸豆和绿豆籽粒外部细胞壁结构及内部结构差异导致。

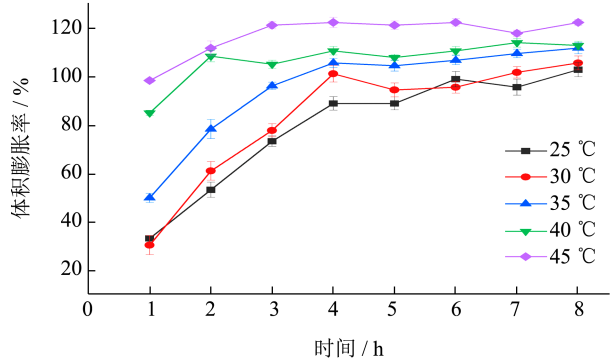


图 4 不同温度和时间浸泡的红芸豆体积膨胀率变化

Fig.4 Changes in volumetric expansion of red kidney beans soaked at different temperatures and times

2.4 红芸豆浸泡Peleg模型分析

Peleg 模型建立红芸豆吸水方程如图 5 和图 6 所示。不同浸泡温度条件下建立的 Peleg 模型呈现良好线性关系。Peleg 模型线性回归方程计算得到

的速率常数 K_1 、容量常数 K_2 、不同浸泡温度下红芸豆的决定系数 R^2 和相对误差 E 如表 3 所示。通过对 Peleg 方程进行相对误差分析, 相对误差 E 均小于 10%, 表明 Peleg 模型可靠, 能够预测红芸豆浸泡过程中的水分含量。 K_1 随着浸泡温度的升高而逐渐下降, K_1 的倒数为红芸豆样品的初始吸水速率, 表明红芸豆初始吸水率随着温度的升高而增加, 此结果与杨积鹏等^[12]研究豌豆浸泡和刘旭等^[24]研究大豆浸泡过程中 Peleg 模型参数变化趋势相似。容量常数 K_2 与温度之间的关系没有一致的定论。如 Marques 等^[25]研究发现不同玉米品种间的 K_2 与温度没有明显对应关系。Li 等^[10]研究黑豆浸泡过程中的吸水动力学得到 K_2 随温度的升高而降低。Jideani 等^[26]研究班巴拉花生吸水特性时, 发现 K_2 在 25~75 °C 范围内随温度升高而增大, 而在 100 °C 时呈现下降趋势。

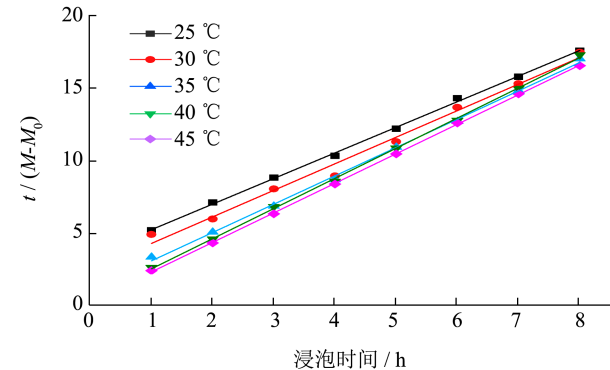


图 5 Peleg 模型对红芸豆浸泡过程中吸水率拟合效果
Fig.5 Effectiveness of the Peleg model in fitting water absorption during soaking of red kidney beans

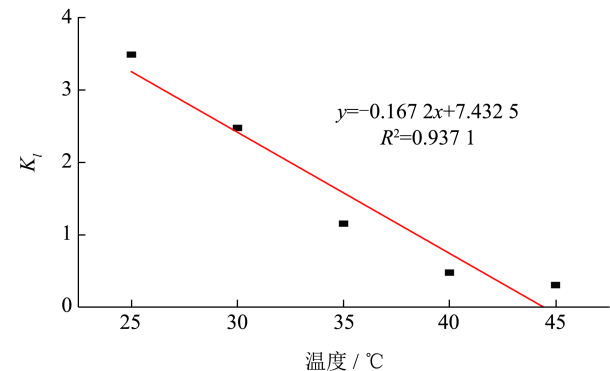


图 6 浸泡温度对 Peleg 常数 K_1 的影响
Fig.6 Effect of immersion temperature on the Peleg constant K_1

2.5 红芸豆浸泡过程 T_2 弛豫时间变化

低场核磁共振技术可分析红芸豆中质子迁移情况, 原料在在 25 °C 和 45 °C 条件下分别浸泡 2、4、6、8 h。浸泡前后红芸豆低场核磁横向弛豫时间分布曲

线如图 7、图 8 和图 9 所示。可以看出, 未处理红芸豆中存在 3 种质子团, 分别为 T_{21} 、 T_{22} 、 T_{23} , 分子的迁移率越高, T_2 的弛豫时间越长。 T_{21} 是由 CH 质子组成的结合水, 它与蛋白质和淀粉等大分子物质相结合, 流动性和迁移低^[27-29]。 T_{22} 是由游离 OH 和 CH 质子构成的游离水。 T_{23} 是由氢质子和自由度高的小分子物质构成的弱结合水。

表 3 不同浸泡温度对红芸豆浸泡Peleg常数的影响				
Table 3 Effect of different soaking temperatures on the Peleg constant of red kidney bean soaking				
温度/°C	K_1	K_2	R^2	$E/\%$
25	$3.488\ 7 \pm 0.114\ 7^a$	$1.763\ 1 \pm 0.022\ 7^a$	0.999 1	3.77
30	$2.477\ 5 \pm 0.373\ 7^b$	$1.828\ 8 \pm 0.074\ 0^b$	0.990 3	4.13
35	$1.155\ 7 \pm 0.155\ 9^c$	$1.951\ 2 \pm 0.038\ 6^c$	0.998 5	1.80
40	$0.480\ 4 \pm 0.116\ 1^d$	$2.076\ 7 \pm 0.023\ 0^d$	0.999 3	1.69
45	$0.308\ 4 \pm 0.052\ 8^d$	$2.034\ 6 \pm 0.010\ 5^d$	0.999 8	0.83

注: K_1 为速率常数, K_2 为容量常数, R^2 为决定系数, E 为相对误差。

在浸泡过程中, 红芸豆内部水分子质子发生交换。经过浸泡处理后 T_{21} 、 T_{22} 、 T_{23} 信号强度增强, T_{22} 增加最大, 水分含量的增加主要是自由水增加引起。浸泡时间增加, 红芸豆内水分自由度增加, 增强水分子流动性增强。 T_{21} 的信号强度增加可能是红芸豆中的蛋白质、淀粉和纤维素等大分子物质与水分子结合导致。浸泡时间增加会使红芸豆内部 T_{22} 达到饱和状态, 会使流动性强的质子转化为流动性弱的质子。 T_{23} 信号强度增加是浸泡时间延长, 红芸豆子叶细胞细胞质水分增加, 水分子进入到组织内部。在 25 °C 条件下浸泡 6 h T_{22} 信号强度与浸泡 8 h 相差约为 4%, 差异较小, 质子交换处于一个平衡状态。在 45 °C 浸泡条件下浸泡 4 h 与浸泡 6 h T_{22} 信号强度差异缩小, 说明在浸泡过程中高温可以促进质子间的交换, 缩短浸泡所需时间。

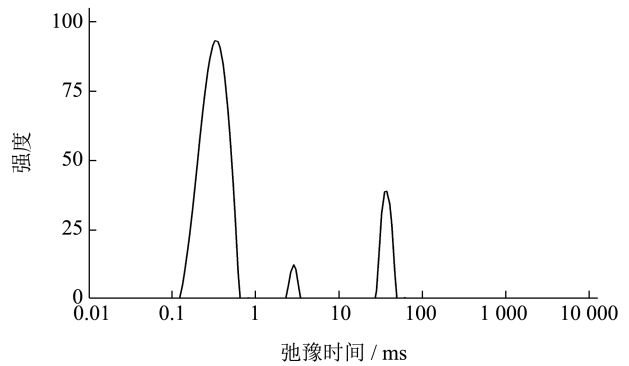


图 7 未浸泡红芸豆曲线
Fig.7 Unsoaked red kidney bean curve

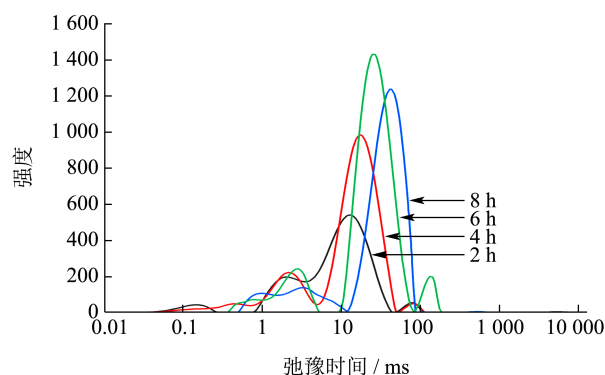


图 8 25 °C 浸泡红芸豆曲线

Fig.8 Soaking red kidney bean curves at 25 °C

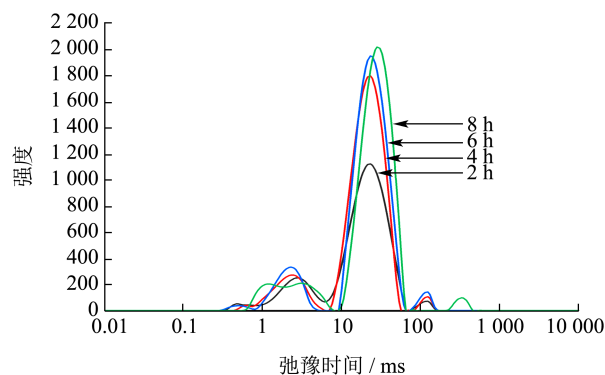
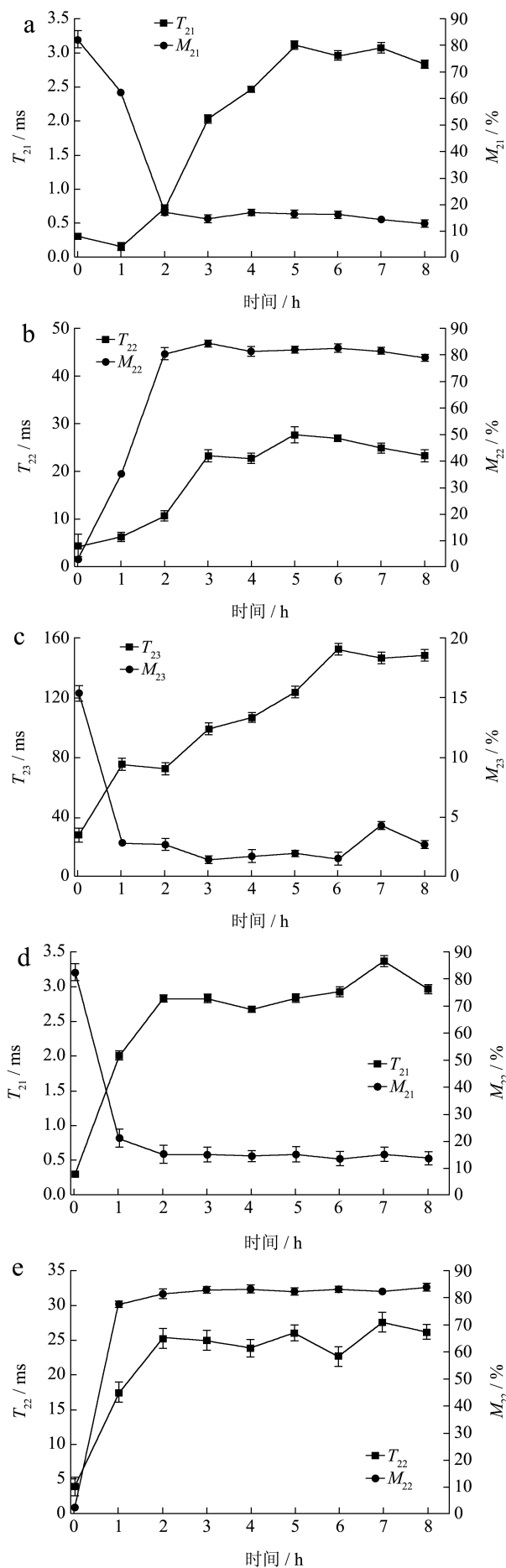


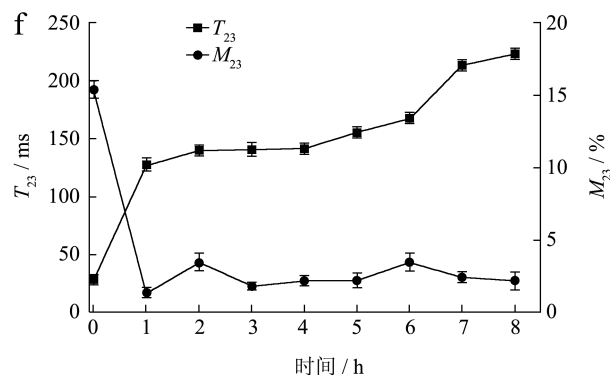
图 9 45 °C 浸泡红芸豆曲线

Fig.9 Soak red kidney bean curves at 45 °C

2.6 红芸豆浸泡过程中不同状态水分含量变化

红芸豆样品在 25 °C 和 45 °C 条件下浸泡, 每间隔 1 h 弛豫时间 T_{21} 、 T_{22} 、 T_{23} 变化和 M_{21} 、 M_{22} 、 M_{23} 信号比的变化如图 10 所示。可以看出, 在 25 °C 时, T_{21} 、 T_{22} 、 T_{23} 的弛豫时间均有所增加。 T_{21} 弛豫时间变化最小, M_{21} 在 2 h 后达到稳定状态, 表明在浸泡过程中红芸豆中结合水波动范围小呈现稳定状态。 M_{22} 从 2.32% 上升至 80%, 说明自由水增加, 即 T_{22} 为主要增加的水分。 T_{23} 增加幅度较大, 说明 T_{23} 在浸泡中比较敏感, 在水分子进入细胞质后致使质子迁移率升高。45 °C 条件下获得与 25 °C 相似结果。 T_{22} 在 25 °C 和 45 °C 弛豫时间达到稳定状态需要 2 h 和 1 h, 说明温度高时水分子渗透速度快, 内部水分达到饱和时间短。45 °C 浸泡前 1 h T_{22} 从约 4.04 ms 增加到 25.28 ms, 而后增加趋势平缓, 说明前 2 h 红芸豆处于快速吸水阶段, 随着浸泡时间增加吸水速率逐渐变小, 这与吸水率随浸泡时间变化趋势一致。综合 T_{21} 、 T_{22} 、 T_{23} 及其质子密度变化情况和吸水率曲线, 浸泡 45 °C, 浸泡时间 4 h 是符合红芸豆的最佳浸泡条件。



图 10 浸泡过程 T_{23} 变化Fig.10 T_2 changes during immersion

注: a、b 和 c 为 25 °C 下浸泡的 T_{21} 、 T_{22} 和 T_{23} , d、e 和 f 为 45 °C 下浸泡的 T_{21} 、 T_{22} 和 T_{23} 。

2.7 红芸豆浸泡过程中核磁共振成像变化

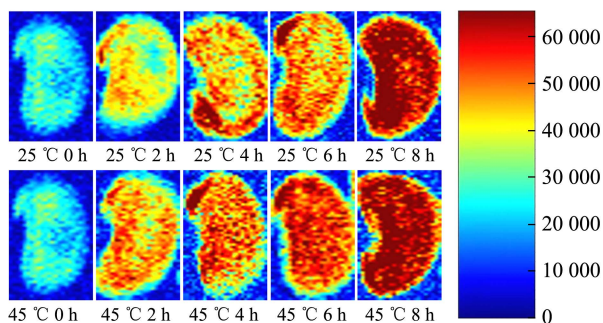


图 11 红芸豆核磁成像图

Fig.11 Magnetic Imaging of Red Kidney Beans

红芸豆在不同时间和温度条件下浸泡后水分分布变化如图 11 所示。可以看出, 未经浸泡处理的红芸豆样品图像近乎呈绿色, 说明原料中游离水含量较少。样品经浸泡后, 图像呈现红色, 且随着浸泡时间的延长, 红色区域颜色加深, 说明浸泡过程中样品籽粒水分分布发生变化。在浸泡 2 h 时, 由于种皮结构致密, 致使水分难于渗透到内部。随着浸泡时间增加, 红色区域增多, 水分子渗入子叶内部, 形成水分梯度。发现浸泡温度越高, 水分子渗透速率越快, 进入红芸豆内部时间越短。Mikac 等^[30]通过核磁共振成像分析技术研究大豆浸泡过程水分分布变化情况, 水分通过微孔隙进入大豆, 首先在中胚轴和下胚轴发生水合作用, 然后子叶组织水合, 温度越高, 水分渗透速率越快。

3 结论

利用 Peleg 模型、质构分析技术、LF-NMR 和 MRI 对红芸豆浸泡吸水特性及水分动态变化过程进

行研究。得到红芸豆吸水率随着温度的升高而增加, 温度越高吸水速度越快, 且达到平衡时间越短; 硬度先下降后上升至平稳状态; 体积膨胀率随温度和时间增加呈上升趋势与吸水率结果呈正相关性。Peleg 模型较好地描述红芸豆在浸泡过程中吸水特性。在红芸豆的吸水模型中, K_1 随温度升高而减小, 说明初始吸水速率与浸泡温度有关。随浸泡时间的延长, 红芸豆吸水速率逐渐增加, 浸泡温度的升高, 红芸豆中的水分含量达到饱和状态所需时间缩短。LF-NMR 结果表明, 红芸豆在浸泡过程中存在结合水、弱结合水和自由水三种状态的水, 浸泡过程中所增加质子主要是自由水, 结合 MRI 发现水分无规则进入到红芸豆内部。确定最佳浸泡条件为浸泡温度 45 °C、浸泡时间 4 h, 浸泡后红芸豆的水分含量为 56.61%, 硬度 57.80 N, 体积膨胀率 122.22%。本研究预测红芸豆水分含量和质子含量变化, 在一定程度上有助于解决红芸豆加工质量问题。

参考文献

- [1] 王婷. 芸豆预熟化工艺及理化性质研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2017.
- [2] 李琳, 陈丹, 范晓禹, 等. 英国红芸豆抗氧化肽对氧化应激斑马鱼的保护作用研究[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(2): 70-79.
- [3] 蔡文强, 崔嘉航, 朱慧慧, 等. 不同提取方法红芸豆膳食纤维结构、理化性质和降血糖活性分析[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(1): 237-243.
- [4] 王何柱, 朱勇, 朱怡, 等. 基于主成分分析法的贵州芸豆品质评价[J]. 食品与机械, 2020, 36(3): 48-53.
- [5] 郭增旺, 陆涛, 瞿东杨, 等. 四种芸豆蛋白的理化与功能特性分析[J]. 中国食品添加剂, 2016, 8: 199-204.
- [6] ZHANG J S, SHI J, ILIC S, et al. Biological properties and characterization of lectin from red kidney bean (*Phaseolus vulgaris*) [J]. Food Reviews International, 2009, 25(1): 12-27.
- [7] 李次力. 浸泡处理对红芸豆的物理性质及蒸煮品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2008, 5: 101-104.
- [8] KORIYAMA T, SATO Y, IJIMA K, et al. Influences of soaking temperature and storage conditions on hardening of soybeans (*Glycine max*) and red kidney beans (*Phaseolus vulgaris*) [J]. Journal of Food Science, 2017, 82(7): 1546-1556.
- [9] MONTANUCI F D, JORGE L M D M, JORGE R M M. Kinetic, thermodynamic properties, and optimization of barley hydration [J]. Food Science and Technology, 2013, 33(4): 690-698.
- [10] LI P, LI Y, WANG L, et al. Study on water absorption

- kinetics of black beans during soaking [J]. Journal of Food Engineering, 2020, 283: 110030.
- [11] FALCAO H G, HANDA C L, SILVA M B R, et al. Soybean ultrasound pre-treatment prior to soaking affects β -glucosidase activity, isoflavone profile and soaking time [J]. Food Chemistry, 2018, 269: 404-412.
- [12] 杨积鹏,魏华,刘建福.豌豆浸泡过程中的吸水动力学研究[J].食品工业科技,2022,43(8):105-110.
- [13] 黎秋云,李森,管骁,等.真空联合超声对大米吸水和蒸饭特性的影响[J].食品与生物技术学报,2020,39(12):42-48.
- [14] GB 5009.3-2016,食品安全国家标准食品中水分的测定[S].
- [15] 谢丹,蹇伟,孙逸文,等.糙米浸泡吸水与微量吸水动力学比较研究[J].粮食科技与经济,2022,47(2):97-100.
- [16] 胡秀发,陈燕美,张喜玲,等.超声辅助NaCl浸泡对熟化黑豆结构和消化特性的影响[J].食品工业科技,2024,45(6):121-127.
- [17] 陈贞.外源酶及预糊化改善黑米的食用品质研究[D].成都:西华大学,2019.
- [18] PELEG M. An empirical model for the description of moisture sorption curves [J]. Journal of Food Science, 1988, 53(4): 1216-1217.
- [19] 司梦佳,朱文学,白喜婷,等.基于低场核磁共振技术研究油莎豆热泵干燥特性[J].中国粮油学报,2023,38(5):19-26.
- [20] 刘阳,李丹丹,陶阳,等.超声和碳酸氢钠处理对绿豆浸泡特性的影响[J].食品工业科技,2022,43(15):42-49.
- [21] MIANO A C, GARCIA J A, AUGUSTO P E D. Correlation between morphology, hydration kinetics and mathematical models on andean lupin (*Lupinus mutabilis* sweet) grains [J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 61(2): 290-298.
- [22] 李鹏.黑豆吸水模型及预熟化过程结构变化的研究[D].无锡:江南大学,2020.
- [23] 王大为,董欣,张星,等.不同浸泡方法对绿豆吸水特性的影响[J].食品科学,2017,38(13):83-89.
- [24] 刘旭,华欲飞,陈业明,等.大豆浸泡动力学研究[J].安徽农业科学,2017,45(18):77-80.
- [25] MARQUES B C, JORGE L M D M, JORGE R M M. Chemical properties and water absorption kinetics of transgenic corn grain (2B587 Hx) and its conventional isolate (2B587) [J]. Journal of Cereal Science, 2016, 71: 93-98.
- [26] JIDEANI V A, MPOTOKWANA S M. Modeling of water absorption of Botswana bambara varieties using Peleg's equation [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 92(2): 182-188.
- [27] CHITRAKAR B, ZHANG M, BHANDARI B. Novel intelligent detection of safer water activity by LF-NMR spectra for selected fruits and vegetables during drying [J]. Food and Bioprocess Technology, 2019, 12(7): 1093-1101.
- [28] ZHU L, CHENG L L, ZHANG H, et al. Research on migration path and structuring role of water in rice grain during soaking [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 92: 41-50.
- [29] LIN S Y, YANG S L, LI X F, et al. Dynamics of water mobility and distribution in soybean antioxidant peptide powders monitored by LF-NMR [J]. Food Chemistry, 2016, 199: 280-286.
- [30] MIKAC U, SEPE A, SERSA I. MR microscopy for noninvasive detection of water distribution during soaking and cooking in the common bean [J]. Magn Reson Imaging, 2015, 33(3): 336-345.