

# 基于 $T_{21}$ 峰值时间预测粳稻米质构变化

宋伟 李冬坤 乔琳 苏安祥 胡婉君

(南京财经大学食品科学与工程学院;江苏省现代粮食流通与安全协同创新中心;  
江苏高校粮油质量安全控制及深加工重点实验室,南京 210023)

**摘要** 研究含水量 14.5% 的粳稻谷在 30 ℃ 的储藏条件下硬度、黏着性、低场核磁特征数据的变化规律,采取逐步回归分析方法筛选低场核磁特征数据,旨在得到通过低场核磁特征数据预测粳稻米硬度、黏着性的线性回归方程。研究表明,储藏期间粳稻米硬度由初始的 1 887.61 g 上升到 4 195.48 g,黏着性随着储藏时间的延长而逐渐降低,从  $-15.77 \text{ g} \cdot \text{s}$  下降至  $-200.20 \text{ g} \cdot \text{s}$ ,  $T_{21}$  峰面积随时间增加不断减小,从 19 181.34 减小到 15 360.95。  $T_{21}$  峰值时间的减少表明随着储藏时间延长水分散失,水分子受到的束缚力不断增大。储藏过程中粳稻米的硬度和黏着性均与  $T_{21}$  峰值时间具有极显著的线性关系,基于  $T_{21}$  峰值时间的硬度预测模型为:  $y = -6 758.1x + 8 622.3 (r^2 = 1.00)$ ;黏着性预测模型为:  $y = 546.65x - 559.91 (r^2 = 1.00)$ 。

**关键词** 粳稻米  $T_{21}$  峰值时间 质构

**中图分类号**: TS207.3 **文献标识码**: A **文章编号**: 1003-0174(2017)01-0104-05

稻谷作为我国的主要储备粮种,储备量大,但由于其受外界环境影响较大,容易发生品质变化<sup>[1]</sup>,影响稻米食用品质。质构是衡量精米食用品质的重要指标,其中食品的硬度受到含水量、蛋白质含量、盐含量、淀粉含量和胶类物质种类及添加量等的影响<sup>[2]</sup>,黏着性则是黏附力和内聚力综合作用的结果<sup>[3]</sup>。质构作为评价食品食用指标,已广泛应用于精米食用品质评价<sup>[4-6]</sup>。曹崇江等<sup>[7]</sup>研究发现抗菌包装袋储藏的稻米硬度和黏着性相对优于普通包装储藏的稻米;王萍等<sup>[8]</sup>研究表明红枣中的水分、还原糖对于红枣的质构特性影响较大。

低场核磁作为一种新兴的检测手段,目前广泛应用于食品领域<sup>[9-11]</sup>。低场核磁具有无损、快速、样品需要量少等特点,可以极大提高工作效率。低场核磁的基本原理<sup>[12]</sup>是激发态的进动核释放能量返回到热平衡态,或者进动核之间相互影响失去它们相位一致性的过程,此过程称为弛豫过程,将描述弛豫过程的时间常数称为弛豫时间。弛豫过程有 2 种形式:横向弛豫(又称为自旋-自旋弛豫)和纵向弛豫(又称为自旋-晶格弛豫)。纵向弛豫时间用  $T_1$  表示,横向弛豫时间用  $T_2$  表示。由于不同结合程度的

氢质子所处的物理化学环境以及自身状态不同而具有不同的  $T_1$  和  $T_2$ ,从而可以获得样品的内部信息,研究样品的品质变化。

本试验主要研究通过筛选粳稻米低场核磁数据建立与硬度、黏着性的线性回归模型,为快速无损检测稻米食用品质提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与设备

2013 年产淮稻 5 号粳稻谷,含水量 14.5%;NMI-20 Analyst 型核磁共振分析仪:上海纽迈电子科技有限公司;RDN 型分段可编程人工气候箱:宁波东南仪器有限公司;食品物性测定仪:Stable Micro Systems (英国)公司。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 模拟储藏方法

预处理样品初始含水量为 20.73%,通过自然干燥将水分调节为 14.5%,置于温度为 30 ℃ 的人工气候箱进行模拟储藏。储藏时间为 180 d,测定周期为 30 d。

#### 1.2.2 质构测试

将粳稻谷制成精米进行蒸煮,蒸煮条件为精米量为 10 g,米水比例为 1:1.2,蒸煮时间为 30 min,保温 10 min。质构测试条件为采用 P/36R 的探头检测,校正高度设定为 20 mm,校正速度为 15 mm/s,

基金项目:粮食公益性行业科研专项(201313002)

收稿日期:2015-06-12

作者简介:宋伟,男,1957 年出生,教授,粮油储藏技术与储藏物害虫防治

75%的压缩比例,触发力 10 g,测前速度:1.0 mm/s,测试速度:0.5 mm/s,测后速度:0.5 mm/s。

1.2.3 核磁数据采集

采用 SF1 (主频) = 19 MHz, O1 (偏频) = 915 052.2 Hz, SF1 + O1 为中心频率,每次检测前均需校正中心频率;P1 (90°硬脉冲脉宽) = 12  $\mu$ s, P2 (180°硬脉冲脉宽) = 25  $\mu$ s; TD (采样点数) = 135 006; SW (采样频率) = 200 kHz; TW (采样等待时间) = 1 500 ms; RFD (开始采样时间) = 0.06 ms; DL1 (90°与 180°脉冲间隔时间) = 0.1 ms; NECH (回波个数) = 3 000; NS (重复采样次数) = 16 的 CPMG 序列检测参数对 1.50 g 稻谷样品进行采样检测,检测结束后利用仪器自带软件的 CONTIN 算法进行反演。

2 结果与分析

2.1 粳稻米的不同储藏时间质构与低场核磁特征数据变化

由表 1 可以看出随储藏时间的延长粳稻米的硬度值不断增加,初始值为 1 887.61 g,经过 6 个月储藏硬度值上升到 4 195.48 g,而黏着性随储藏时间不断降低,含水量 14.5%、温度 30℃ 条件下黏着性从 -15.77 g · s 下降至 -200.20 g · s,这与曹崇江等<sup>[13]</sup>的研究相一致。 $T_{21}$ 峰代表粳稻谷吸附水,由于粳稻谷含水量较低,自由水的束缚力较低,先行散失,所以  $T_{22}$ 峰在较低含水量的粳稻谷中是不出现的, $T_{23}$ 峰代表粳稻谷中脂肪的氢质子的密度。由  $T_{21}$ 的峰面积变化可以发现,粳稻谷在储藏过程中水分是逐渐散失的, $T_{21}$ 峰值时间不断减小说明随着时间的延长,粳稻谷的水中氢质子所受束缚力越来越大。由于脂肪的氧化和水解成游离脂肪酸,游离脂肪酸的氢质子的束缚力相对脂肪而言较低,使得部分束缚力较大的氢质子得到释放, $T_{23}$ 峰面积呈逐渐增加趋势。

表 1 不同储藏时间粳稻米质构与低场核磁特征数据变化

时间 /d	硬度 /g	黏着性 /g · s	$T_{21}$ 峰面积	$T_{23}$ 峰面积	$T_{21}$ 峰时间 /ms	$T_{23}$ 峰时间 /ms
0	1 887.61	-15.77	19 181.34	1 867.41	1.00	117.87
30	2 142.18	-34.36	18 812.84	1 872.81	0.96	115.72
60	2 447.22	-59.88	17 559.62	1 873.11	0.91	91.31
90	3 019.16	-107.68	17 410.72	1 915.66	0.83	114.98
120	3 420.08	-139.70	16 558.95	1 939.62	0.76	126.45
150	3 642.18	-158.39	16 322.19	1 946.26	0.74	126.45
180	4 195.48	-200.20	15 360.95	2 066.34	0.66	124.01

2.2 建立不同储藏时间粳稻米硬度与  $T_{21}$  峰值时间的数学模型

利用 SPSS 软件粳稻米质构值与低场核磁数据

采取逐步回归分析方法进行线性建模,寻求数学分析模型雏形。从表 2 可以看出,通过向前逐步的模式对低场核磁特征数据进行筛选,得到了与硬度值具有较好线性关系的  $T_{21}$ 峰值时间。由此可以得出,影响粳稻米硬度值主要是水中氢质子的密度与强度。当粳稻米水分子受到的束缚力越大,其硬度值越高。利用逐步回归分析方法得到基于  $T_{21}$ 峰值时间的粳稻米硬度值,由图 1 可以看出硬度的真实值与预测值具有极显著的相关关系 ( $P < 0.01$ )。将得到的预测值与  $T_{21}$ 峰值时间进行线性拟合得到拟合方程: $y = -6 758.1x + 8 622.3 (r^2 = 1.00)$ ,如图 2。

表 2 硬度与  $T_{21}$  峰值时间模型建立摘要

目标	硬度
模式选择方法	向前逐步
资讯准则	55.555
效果 $T_{21}$ 峰值时间	√
准确度	99.80%
$T_{21}$ 峰值时间	预测器的重要性 = 1

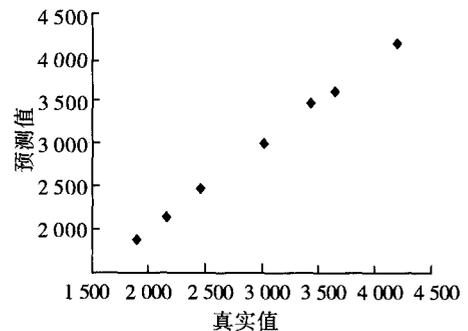


图 1 硬度真实值与预测值之间的关系

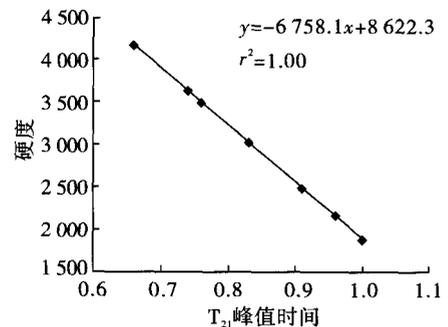


图 2 硬度值与  $T_{21}$  峰值时间的关系

2.3 建立不同储藏时间粳稻米黏着性与  $T_{21}$  峰值时间的数学模型

通过 SPSS 软件粳稻米黏着性与低场核磁数据采取逐步回归分析方法进行线性建模,寻求数学分析模型雏形。从表 3 可以看出, $T_{21}$ 峰值时间与黏着性具有较好线性关系(预测器的重要性 = 1)。利用

逐步回归分析方法得到粳稻米黏着性的预测值,由图3可以看出黏着性的真实值与预测值具有极显著的相关关系( $P < 0.01$ ),进一步说明通过低场核磁可以预测粳稻米的黏着性。粳稻米黏着性与其 $T_{21}$ 峰值时间有显著相关关系, $T_{21}$ 峰值时间越低黏着性越低,说明水分的束缚力是影响粳稻米黏着性的主要因素。将得到的预测值与 $T_{21}$ 峰值时间进行线性拟合得到拟合方程: $y = 546.65x - 559.91$  ( $r^2 = 1.00$ ),如图4。

表3 硬度与 $T_{21}$ 峰值时间模型建立摘要

目标	黏着性
模式选择方法	向前逐步
资讯准则	19.883
效果 $T_{21}$ 峰值时间	✓
准确度	99.80%
$T_{21}$ 峰值时间	预测器的重要性=1

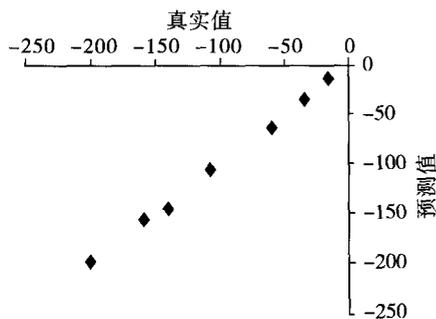


图3 黏着性真实值与预测值之间的关系

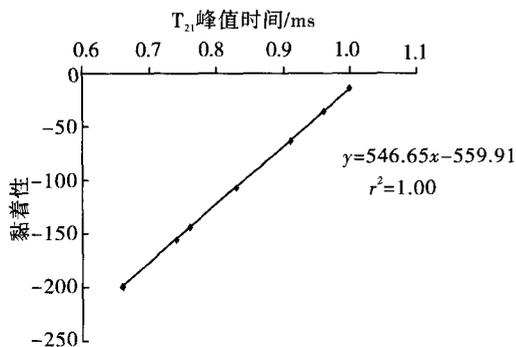


图4 黏着性与 $T_{21}$ 峰值时间的关系

#### 2.4 基于 $T_{21}$ 峰值时间数学模型预测质构数据变化的验证

将初始含水量为14.5%温度为30℃条件下粳稻米的硬度、黏度实测值与预测值进行比较,结果见表4。

硬度与黏着性的模型预测值与实测值的相对误差除了1个异常值15.93%之外,其余均在0.4%~5.0%之间,说明这些模型可以较好地预测过程中

粳稻米的硬度、黏着性变化进行预测( $r^2 = 1.00$ )。

表4 粳稻米储藏时间的硬度、黏度实测值与预测值的比较

指标	实测值	预测值	相对误差/%
硬度	1 887.61	1 864.24	1.24
	2 142.18	2 134.57	0.36
	2 447.22	2 472.47	-1.03
	3 019.16	3 013.12	0.20
	3 420.08	3 486.18	-1.93
	3 642.18	3 621.34	0.57
	4 195.48	4 161.99	0.80
	黏着性	-15.77	-13.26
-34.36		-35.12	-2.22
-59.88		-62.46	-4.30
-107.68		-106.19	1.39
-139.70		-144.45	-3.40
-158.39		-155.39	1.90
	-200.20	-199.12	0.54

利用预测模型对温度30℃不同储藏条件下粳稻米硬度、黏度值进行拟合,结果见表5。

表5 粳稻米不同储藏条件硬度、黏度实测值与预测值的比较

指标	初始含水量/%	Pearson 系数
硬度	13.5	0.001
	15.5	0.008
	16.5	0.003
黏度	13.5	0.001
	15.5	0.001
	16.5	0.000

由表5可以看出,不同储藏条件下的实测数据和预测数据数值之间均具有显著的相关性( $P < 0.01$ )。

### 3 结论

3.1 储藏期间粳稻米硬度随着储藏时间的延长而逐渐升高,由初始的1 887.61 g上升到4 195.48 g。黏着性随着储藏时间的延长而逐渐降低,从-15.77 g·s下降至-200.20 g·s。 $T_{21}$ 峰面积随时间增加不断减小,从19 181.34减小到15 360.95。 $T_{21}$ 峰值时间则缓慢减少,表明随着储藏时间延长水分散失,水分子受到的束缚力不断增大。

3.2 储藏过程中粳稻米的硬度和黏着性均与 $T_{21}$ 峰值时间具有极显著的线性关系,基于 $T_{21}$ 峰值时间的硬度预测模型为: $y = -6 758.1x + 8 622.3$  ( $r^2 = 1.00$ );黏着性预测模型为: $y = 546.65x - 559.91$  ( $r^2 = 1.00$ ),这些模型可以较好地预测过程中粳稻米的硬度、黏着性变化进行预测( $r^2 = 1.00$ )。

#### 参考文献

- [1] 宋伟,谢同平,张美玲,等. 应用电子鼻判别不同储藏条件

- 下粳稻谷品质的研究[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(5): 92-96
- Song Wei, Xie Tongping, Zhang Meiling, et al. Distinguishing the quality of japonica rice stored at different storage conditions by using electronic nose[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2012, 27(5): 92-96
- [2] 郝红涛, 赵改名, 柳艳霞, 等. 肉类制品的质构特性及其研究进展[J]. 食品与机械, 2009(3): 125-128
- Hao Hongtao, Zhao Gaiming, Liu Yanxia, et al. The texture characteristics and advances of meat products[J]. Food & Machinery, 2009(3): 125-128
- [3] 郭世良, 赵改名, 王玉芬, 等. 离子强度和 pH 值对肌原纤维蛋白热诱导凝胶特性的影响[J]. 食品科技, 2008, 33(1): 84-87
- Guo Shiliang, Zhao Gaiming, Wang Yufen, et al. Effects of ionic strength and pH values on the characteristics of heat-induced gelation of myofibrillar proteins[J]. Food Science and Technology, 2008, 33(1): 84-87
- [4] 胡丽菊, 孟宪军, 孙希云, 等. 不同预处理方式对冻藏草莓品质的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(22): 293-296
- Hu Liju, Meng Xianjun, Sun Xiyun, et al. Effect of different pretreatments on the quality of frozen strawberries[J]. Food Science, 2014, 35(22): 293-296
- [5] 谢新华, 李晓方, 肖昕, 等. 稻米淀粉黏滞性和质构性研究[J]. 中国粮油学报, 2007, 22(3): 9-11
- Xie Xinhua, Li Xiaofang, Xiao Xin, et al. Quality evaluation of steamed bread by traditional fermentation[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2007, 22(3): 9-11
- [6] 王充, 张国权, 罗勤贵, 等. 淀粉凝胶储藏过程中消化和质构特性的变化[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(4): 32-37
- Wang Chong, Zhang Guoquan, Luo Qingui, et al. Study on digestibility and texture properties changes of starch gels during storage[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2012, 27(4): 32-37
- [7] 曹崇江, 马海炜, 刘兵, 等. 纳米包装材料对稻谷储藏品质的影响[J]. 粮食储藏, 2014, 43(6): 34-36
- Cao Chongjiang, Ma Haiwei, Liu Bing, et al. Determination of the content of organic phosphorus pesticide in the grain by gas chromatography[J]. Grain Storage, 2014, 43(6): 34-36
- [8] 王萍, 弋晓康, 陆建康, 等. 基于热风干燥条件下新疆红枣的质构特性[J]. 食品工业科技, 2014, 35(11): 123-126
- Wang Ping, Yi Xiaokang, Lu Jiankang, et al. Textural properties of red dates from Xinjiang based on hot air drying conditions[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(11): 123-126
- [9] 姜潮, 韩剑众, 范佳利, 等. 低场核磁共振结合主成分分析法快速检测掺假牛乳[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 340-344
- Jiang Chao, Han Jianzhong, Fan Jiali, et al. Rapid detection of adulterated milk by low field-nuclear magnetic resonance coupled with PCA method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(9): 340-344
- [10] Micklander E, Thybo A K, van den Berg F. Changes occurring in potatoes during cooking and reheating as affected by salting and cool or frozen storage - a LF-NMR study[J]. LWT - Food Science and Technology, 2008, 41(9): 1710-1719
- [11] Ribeiro O O R, Mársico E T, Carneiro C S, et al. Detection of honey adulteration of high fructose corn syrup by low field nuclear magnetic resonance (LF  $^1\text{H}$  NMR) [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 135: 39-43
- [12] 阮榕生. 核磁共振技术在食品和生物体系中的应用[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2009
- Ruan Rongsheng. Application of nuclear magnetic resonance technology in food and biological systems[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2009
- [13] 曹崇江, 杨文建, 宋伟, 等. 含纳米 Ag-TiO<sub>2</sub> 的聚乙烯包装材料对大米储藏品质的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(24): 327-330
- Cao Chongjiang, Yang Wenjian, Song Wei, et al. Effect of Ag-TiO<sub>2</sub> Nano-polyethylene packaging material on quality of stored Rice[J]. Food Science, 2014, 35(24): 327-330.

## The Prediction Texture Changes of Japonica Rice Based on the Peak Time of $T_{21}$

Song Wei Li Dongshen Qiao Lin Su Anxiang Hu Wanjuan

(College of Food Science and Engineering; Collaborative Innovation Center for

Modern Grain Circulation and Safety; Key Laboratory of Grains and Oils Quality Control and Processing,

Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210023)

**Abstract** Monitor the changes of hardness, adhesiveness, characteristic data of low field NMR during japonica storage under the temperature of 30 °C and the water content of 14.5%, binding stepwise regression analysis method to screen the characteristic data of low field NMR and establish the linear regression equation to predict the hardness and adhesiveness of japonica. The results showed that hardness was from 1 887.61 g to 4 195.48 g, adhesiveness was gradually decreased with storage time, adhesiveness was from -15.77 g · s to -200.20 g · s, peak area of  $T_{21}$  decreased along with the increase of time, from 19 181.34 turn to 15 360.95. The decrease of peak time of  $T_{21}$  showed that water desorption with time extension, and the bound water molecules were increasing. During the storage of Japonica Rice hardness and adhesiveness had extremely significant linear relationship with the peak time of  $T_{21}$ , The peak time of  $T_{21}$  hardness prediction model:  $y = -6 758.1x + 8 622.3$  ( $r^2 = 1.00$ ); adhesiveness prediction model:  $y = 546.65x - 559.91$  ( $r^2 = 1.00$ ).

**Key words** japonica, peak time of  $T_{21}$ , texture

(上接第 28 页)

## Effects of Ultra High Pressure on Structure and Pasting Properties of Corn Starch

Pu Huayin<sup>1,2</sup> Wang Le<sup>1</sup> Huang Junrong<sup>1</sup> Chen Yanchun<sup>1</sup> Li Hongliang<sup>1</sup>

(School of Food and Biological Engineering, Shaanxi University of Science and Technology<sup>1</sup>, Xi'an 710021)

(Engineering Research Center of Starch and Vegetable Protein Processing, Ministry of Education, South China University of Technology<sup>2</sup>, Guangzhou 510640)

**Abstract** The effects of ultra high pressure on structure and pasting properties of corn starch were investigated by using light microscope, X-ray diffractometer, Differential Scanning Calorimeter and rapid viscosity analyzer. The results showed that ultra high pressure treatment could induce starch gelatinization. Corn starches were completely gelatinized treated at 500 MPa for 15 min or at 600 MPa for 5 min. However, starches were not gelatinized even at 400 MPa for 30 min. During ultra pressure-induced gelatinization, the structure of starch granules was gradually destroyed and swelled, whereas the crystal structure was transformed from the A-type crystallite to the V-type crystallite. In addition, the peak viscosity in RVA viscosity curve was disappeared. Ultra high pressure treatment under suitable conditions could result in the annealing and crystal disintegration of starch granules. The internal annealing effect of starch prevailed over after a pressure treatment at 400 MPa for 5~10 min, so the relatively crystallinities, gelatinization temperature ( $T_o$ ,  $T_p$ ) and enthalpy were increased, while the peak viscosity was decreased in RVA curves.

**Key words** ultra high pressure, corn starch, crystal structure, pasting properties