

陈铭学研究员主持“稻米质量安全与品质评价”特约专栏文章之一

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2023.06.001

邵雅芳, 余静, 郑欣, 等. 不同贮藏环境和时间对大米质量影响的研究[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(6): 1-9.

SHAO Y F, YU J, ZHENG X, et al. Effects of different storage environment and time on rice quality[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(6): 1-9.

不同贮藏环境和时间对大米 质量影响的研究

邵雅芳¹, 余 静¹, 郑 欣¹, 朱大伟¹, 徐清宇¹,
方长云¹, 王 勇², 陈铭学¹✉

(1. 中国水稻研究所 农业农村部稻米及制品质量监督检验测试中心, 浙江 杭州 310006;

2. 浙江苏泊尔家电制造有限公司, 浙江 杭州 310051)

摘 要: 为研究龙粳 31 大米在高温高湿普通米桶、高温高湿负压米桶、室温普通米桶和室温负压米桶贮藏期间品质变化的规律, 探究贮藏环境和时间对大米质量状况的影响。检测和分析大米外观、脂肪酸值、食味值、直链淀粉、蛋白质、脂肪酸组成和含量、米粉糊化特性等指标, 并在贮藏环境和贮藏时间两个维度上对数据进行可视化雷达图分析。结果表明高温高湿和贮藏时间的延长能加速大米品质的劣化, 不同贮藏环境和时间对峰值黏度 (1 991 ~ 2 859 cP)、最终黏度 (2 650 ~ 3 334 cP)、最低黏度 (1 459 ~ 2 182 cP)、脂肪酸值 (2.74 ~ 32.58 mg/100 g)、油酸 (1.12 ~ 1.81 mg/g)、亚油酸 (2.68 ~ 3.53 mg/g) 和食味值 (68.72 ~ 80.30 分) 等指标具有显著的影响 ($P < 0.05$)。雷达图分析表明, 高温高湿普通米桶贮藏大米品质劣化的品质指标主要为脂肪酸值、油酸和亚油酸; 高温高湿负压米桶贮藏大米品质劣化的指标主要为峰值黏度和最终黏度; 室温普通米桶和室温负压米桶贮藏大米品质劣化的指标为峰值黏度和最低黏度。不同贮藏时间上, 峰值黏度和最低黏度呈现出先上升后下降的趋势, 脂肪酸值持续升高, 油酸和亚油酸含量在贮藏到 15 天后急剧下降, 食味值逐渐降低。综上, 短时间 (15 天) 的大米贮藏, 负压米桶能更好地保持大米的品质状况; 长时间 (15 天以上) 的大米贮藏, 普通米桶和负压米桶差异不显著。

关键词: 大米; 贮藏; 食味值; 脂肪酸; 糊化特性

中图分类号: TS201.4; S-3 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2023)06-0001-09

网络首发时间: 2023-11-06 09:09:33

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20231103.1139.002>

收稿日期: 2023-06-30

基金项目: 国家水稻产业技术体系 (CARS-01); 浙江省科技计划项目 (2022C02011)

Supported by: the Earmarked Fund for China Agriculture Research System (No. CARS-01); Science and Technology Project of Zhejiang Province (No. 2022C02011)

作者简介: 邵雅芳, 女, 1986 年出生, 博士, 副研究员, 研究方向为稻米营养与品质评价。E-mail: yafang_shao@126.com

通讯作者: 陈铭学, 男, 1972 年出生, 博士, 研究员, 研究方向为稻米质量安全与风险评估。E-mail: cmingxue@126.com。本专栏背景及作者详细介绍见 PC7-8。

Effects of Different Storage Environment and Time on Rice Quality

SHAO Ya-fang¹, YU Jing¹, ZHENG Xin¹, ZHU Da-wei¹, XU Qing-yu¹,
FANG Chang-yun¹, WANG Yong², CHEN Ming-xue¹✉

- (1. Rice Product Quality Supervision and Inspection Center, Ministry of Agriculture and Rural Affairs,
China National Rice Research Institute, Hangzhou, Zhejiang 310006, China;
2. Zhejiang SUPOR Electrical Appliances Manufacturing Co., Ltd, Hangzhou, Zhejiang 310051, China)

Abstract: In order to study the quality variation of Longjing 31 rice in ordinary and negative-pressed rice bucket put in the environment with high temperature and high humidity and room temperature during storage, rice color parameters, fatty acid value, taste value, amylose content, protein content, fatty acid compositions, gelatinization characteristics of rice flour were measured. Two dimensions of rice quality under storage conditions and storage time were analyzed by radar analysis. It showed that high temperature, high humidity and storage time could step up the deterioration of rice quality. Different storage conditions and time had significant effects on peak (1 991~2 859 cP), final (2 650~3 334 cP) and trough viscosity (1 459~2 182 cP), fatty acid value (2.74~32.58 mg/100 g), oleic (1.12~1.81 mg/g) and linoleic acid (2.68~3.53 mg/g), as well as the taste value (68.72~80.30 score) ($P < 0.05$). The radar map analysis showed that quality deterioration indexes of rice stored in high temperature and high humidity ordinary rice bucket were mainly reflected in fatty acid value, oleic acid and linoleic acid; quality deterioration indexes of rice stored in high temperature and high humidity negative-pressed rice bucket were mainly reflected in peak viscosity and final viscosity; quality deterioration indexes of rice stored in common rice bucket at room temperature and negative-pressed rice bucket at room temperature were mainly reflected in peak viscosity and trough viscosity, respectively. For different storage time, the peak and trough viscosity showed a trend of first increase and second decrease, the fatty acid value increased continually, the oleic acid and linoleic acid contents sharply decreased after storage for a certain time, and the taste value gradually decreased. To sum up, it showed that the negative-pressed rice bucket could better maintain the rice quality for short time (15 days) storage, and there were no significant differences between ordinary and negative-pressed rice buckets for long periods (15 days or more) of rice storage.

Key words: milled rice; storage; taste value; fatty acid; gelatinization characteristic

水稻是我国最主要的粮食作物之一。据相关统计结果表明,2020 年我国水稻种植面积约占世界水稻种植面积的 18%,但总产量约占世界水稻总产量的 28%。稻谷或大米在贮藏和/或流通等环节,受温度、湿度和时间等因素的影响,会出现品质劣化的现象^[1-3],体现在外观、营养和食味等方面,大大降低其食用价值和经济价值。

负压是指低于现存的大气压力。一般来说,日常生活中负压的大多采用抽真空的方式产生,造成氧分压的下降,会在一定程度上抑制好氧微生物的繁殖而提高大米的耐储藏性^[4]。研究发现,稻米的脂肪酸值随贮藏时间的延长而升高会导致

稻米挥发性物质组成的改变,引起米饭不愉快气味的产生^[5-6]。同时,稻米的米粉糊化特性会发生变化而影响米饭的质地和口感,这可能是由贮藏过程中长支链淀粉的降解导致的^[3],也可能是由大米蛋白质的结构和功能特性改变导致的^[7]。一般来说,贮藏期间的温度和湿度是影响稻米品质变化的主要因素,温湿度较高时大米品质变化较快。然而,大多数研究均采用高温高湿环境的快速陈化模型或常温模拟仓储环境下的陈化模型或实际仓储中贮藏时间对大米品质的影响,很少研究涉及负压环境的贮藏对大米品质的影响。

本研究将龙粳 31 大米贮藏于 4 个环境下(高

温高湿普通米桶、高温高湿负压米桶、室温普通米桶和室温负压米桶),以新鲜样品为对照,分别在 15 天、30 天和 60 天采样,对大米样品的外观、常规理化品质、脂肪酸组分和含量及米粉糊化特性等参数进行检测和分析,利用雷达图分析法实现大米贮藏环境和贮藏时间两个维度上的可视化分析,以期为大米贮藏品质形成机理和相关品质评价,耐储藏稻米品种的培育提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

2020 年龙粳 31 的种植推广面积达 735 万亩,在常规稻推广面积排名中占第二位,其大米在市场上具有一定的占有量。因此,本研究以产自黑龙江省佳木斯市的龙粳 31 大米为实验材料。稻谷收割烘干至水分含量为 14% 左右,室温放置 3 个月,由桦川县鑫华米业有限公司对稻谷进行脱壳、磨精和抛光等工艺制成商品大米。取商品大米 20 kg,并平均分成 4 份,分别放置于两个普通米桶和两个负压(真空度 15 kPa)米桶中。随后,将一个普通米桶和一个负压米桶放在高温高湿(温度 37 °C,湿度 75%)的培养箱中,模拟南方梅雨天气。同时,另一个普通米桶和负压米桶放在室温(温度 20 °C 左右,湿度 60% 左右)。因此,共有高温高湿普通、高温高湿负压、室温普通和室温负压等 4 个贮藏环境。以新鲜大米为对照(CK),分别于第 15 天、第 30 天和第 60 天取 4 个贮藏环境下的大米各 500 g,放置于自封袋中,冰箱 4 °C 冷藏备用。分析前,取出适量大米于球磨机上研磨成米粉,并过 100 目(0.150 mm)筛,待用。

实验仪器:2010 Geno/Grinder 磨粉机:美国 SPEX SamplePrep 公司;9010-0102 烘箱:德国 Binder 公司;含 BAS-400 自动进样器 BDFIA-7000 全自动流动注射分析仪:北京宝德仪器有限公司;Kjeltec 8400 凯氏定氮仪:日本 FOSS 公司;STA1A 食味仪:日本 SATAKE 公司;6890 气相色谱仪:美国安捷伦公司;TecMaster 快速黏度仪:澳大利亚 PERTEN 公司;米饭食味计:SATAKE 公司。

1.2 大米常规理化品质指标

1.2.1 水分含量

根据国家标准《食品安全国家标准 食品中水分的测定(GB 5009.3—2016)》中的直接干燥法进行测定。

1.2.2 脂肪酸值

根据国家标准《谷物碾磨制品 脂肪酸值测定(GB/T 15684—2015)》测定。

1.2.3 直链淀粉含量

根据农业行业标准《稻米直链淀粉的测定 分光光度法(NY/T 2639—2014)》测定。

1.2.4 蛋白质含量

根据国家标准《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定(GB 5009.5—2016)》中的凯氏定氮法进行测定。

1.2.5 食味值

采用米饭食味计进行测定。

1.3 大米脂肪酸组成

根据农业行业标准《粮食作物中脂肪酸含量的测定 气相色谱法(NY/T 3566—2020)》测定。

1.4 米粉糊化特性

根据农业行业标准《水稻米粉糊化特性测定 快速黏度分析法(NY/T 1753—2009)》测定。

1.5 数据处理

所有参数重复测定两次,结果以平均值±标准差表示。用 SAS 软件对不同贮藏环境和不同贮藏时间下大米的各项品质指标进行方差分析,采用 Tukey 多重比较法检验,显著性水平设置为 $P < 0.05$ 。以新鲜大米为对照,不同贮藏环境和时间下的大米样品与之相比的增减量为基础进行无量纲化处理后,绘制不同贮藏环境和不同贮藏时间下的雷达分析图。

2 结果与分析

2.1 大米外观的变化分析

图 1 可以看出,高温高湿普通米桶中贮藏的大米发灰,胚部颜色呈深黄灰色;高温高湿负压米桶中大米胚的颜色呈黄色。由于大米胚及周边富含大量的脂肪酶、脂氧合酶以及过氧化物酶等

生物活性物质,所以在高温高湿的环境中酶促型水解酸败和氧化酸败将会使局部的过氧化值上升^[8],进而使大米的颜色发生变化。和高温高湿环境相比,室温环境不能满足微生物在短时间内大量繁殖^[4],因而室温环境下的普通和负压米桶中大米的外观颜色变化不明显。

贮藏 60 天后,高温高湿普通米桶中大米的 L、a、b、C 和 H°分别与第 0 天对照样品相比下降了 1.9%、25.1%、67.4%、43.2%和 47.0% (表 1)。对于其余贮藏条件下的大米来说,与对照相比,L、a、b、C 和 H°分别在-0.9%~0.3%、-8.6%~2.9%、-10.6%~10.0%、-9.6%~5.0%和-6.5%~6.4%范围内波动。 ΔE 是 CIELAB 空间视觉均匀条件下,人眼感觉色差的测试单位,值越大表示颜色变化越明显。有研究表明, ΔE 值在 2.5 及以上时,肉眼能明显区分^[9]。因此,本研究中高温高湿条件下普

通米桶中的大米在贮藏 60 天后,颜色已经发生了肉眼可见的变化,而其余条件下的米粉颜色均未发生肉眼可见的变化。

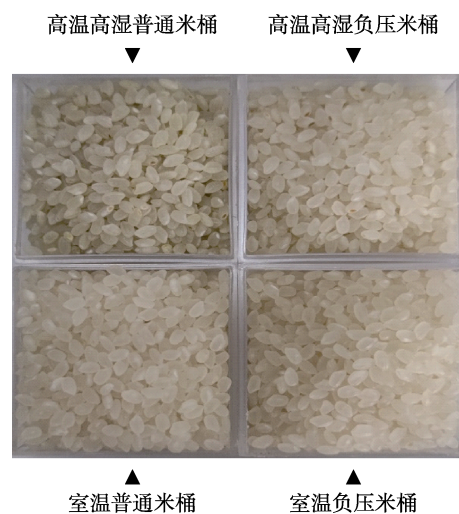


图 1 不同贮藏环境下贮藏 60 天的大米外观情况

Fig.1 Appearance of rice stored for 60 days under different storage conditions

表 1 不同贮藏环境和贮藏时间下大米粉颜色参数的变化情况^a

Table 1 Color parameters of rice flour under different storage environments and time^a

贮藏环境	贮藏时间/天	L	a	b	C	H°	ΔE
高温高湿 (普通米桶)	CK	94.45±0.04BC	3.19±0.05B	-3.36±0.08D	4.64±0.09CD	-46.48±0.2CD	-
	15	94.43±0.04BC	2.93±0.02D	-3.84±0.09F	4.83±0.08AB	-52.65±0.57G	0.55±0.07D
	30	93.41±0.09F	2.53±0.04E	-2.68±0.07B	3.68±0.07F	-46.65±0.35CD	1.41±0.11B
	60	92.68±0.08G	2.39±0.08F	-1.10±0.06A	2.63±0.06G	-24.63±1.57A	2.98±0.04A
高温高湿 (负压米桶)	15	94.75±0.05A	3.17±0.03B	-3.70±0.09EF	4.87±0.09A	-49.44±0.38F	0.45±0.10DE
	30	94.51±0.03B	3.18±0.05B	-3.37±0.02D	4.64±0.02CD	-46.63±0.56CD	0.08±0.01G
	60	94.67±0.05A	3.29±0.04A	-3.11±0.05C	4.53±0.06CD	-43.45±0.30B	0.36±0.01EF
室温 (普通米桶)	15	94.47±0.06BC	3.21±0.03AB	-3.65±0.09E	4.86±0.08A	-48.69±0.41EF	0.29±0.09F
	30	94.09±0.01D	3.02±0.01C	-3.32±0.08D	4.49±0.06D	-47.67±0.70DE	0.40±0.02D-F
	60	94.32±0.01C	3.16±0.04B	-3.40±0.03D	4.64±0.05CD	-47.07±0.28CD	0.14±0.01G
室温 (负压米桶)	15	94.09±0.04D	3.06±0.05C	-3.28±0.13D	4.49±0.12D	-47.03±0.90CD	0.40±0.07D-F
	30	94.34±0.23C	3.17±0.09B	-3.44±0.26D	4.68±0.23BC	-47.29±1.71D	0.28±0.20F
	60	93.63±0.04E	2.92±0.02D	-3.01±0.06C	4.19±0.04E	-45.83±0.60C	0.93±0.04C

注:^a 每列数据后的大写字母表示不同贮藏环境和贮藏时间下的差异性显著,显著性水平为 $P < 0.05$ 。

Note:^a The different capital letters after each column of data indicate significant differences, and the significance level is $P < 0.05$.

2.2 大米常规理化品质的变化分析

水分、脂肪酸值、食味值、直链淀粉和蛋白质含量的变化如表 2 所示。高温高湿普通米桶中大米水分和脂肪酸值均比同期其他贮藏环境下的水分和脂肪酸值高 ($P < 0.05$)。其中,水分高出 0.85 ~ 1.42 g/100 g,脂肪酸值高出 5.93 ~

26.92 mg/100mg。与 GB/T 1354 相比,其水分含量未超标,在粳米 15.5%的范围内。目前,大米脂肪酸值还未有评价标准。参照稻谷储存判定规则^[10],脂肪酸值 ≤ 21.43 mg/100 mg 计时,宜存; 21.43 mg/100 mg $\leq$ 脂肪酸值 ≤ 26.42 mg/100 mg 时,轻度不宜存;脂肪酸值 ≥ 26.42 mg/100 mg 时,

重度不宜存。因此,高温高湿环境下,大米在普通米桶贮藏 30 天后 (32.58 mg/100 mg) 或在负压米桶贮藏 60 天后 (26.65 mg/100 mg), 其品质均达到了重度不宜存等级。总体趋势上来看, 负压米桶能使大米的保质期限延长 10 天左右。

食味值是大米品质判定中最重要的指标之一。整体来看, 高温高湿对大米食味值的影响比较大, 其值均比室温环境贮藏的大米食味值低 ($P < 0.05$)。高温高湿环境下, 贮藏 15 天后大米的食味呈显著下降趋势 ($P < 0.05$), 其普通米桶 (72.55 分) 比负压米桶 (75.33 分) 下降更显著。随着贮藏时间的进一步延长 (30~60 天), 其大米食味值继续下降, 但同期两种米桶中的大米食味值差异不显著。室温环境贮藏 15 天时, 负压米桶中大米的食味值显著高于普通米桶中大米的食味值。从室温环境的不同贮藏时间上来看, 普通米桶中大米的食味值差异不显著 (77.62~77.91 分), 而负压米桶中大米的食味值逐渐下降 (74.63~80.30 分)。据研究表明, 大米贮藏后食味劣化的主要原因可能是由长支链淀粉的降解而导致淀粉微观结构的改变引起的^[3]。综合来看, 本研究结果表明, 短时间 (15 天) 的大米贮藏, 采用负压米桶能更好地保持米饭食味特性; 长时间 (15 天以上) 的大米贮藏, 普通米桶和负压米

桶的贮藏效果无明显区别。

直链淀粉含量是反应大米蒸煮品种的重要指标之一。在不同贮藏环境下, 其含量呈波动下降的趋势 (表 2)。有研究表明, 经过 1 年的贮藏, 大米直链淀粉含量显著上升^[11]; 也有研究表明, 经过 10 个月的贮藏, 大米直链淀粉含量变化不大^[12]。这些差异性结论的得出主要原因是大米直链淀粉含量的变化受品种、贮藏条件 (温度、湿度、贮藏时间等) 和检测方法^[13]等因素的影响。对于蛋白质来说, 其含量在不同贮藏环境和贮藏时间下的差异不显著。由于蛋白质含量测定采用经典的凯氏定氮法进行, 所以对不同贮藏条件下大米中蛋白质组分含量及蛋白亚基结构的变化还需进一步深入研究。

2.3 大米粉糊化特性的变化分析

大米粉的糊化特性曲线又称 RVA 谱, 它是指一定浓度的米粉浆在加热、持续高温和冷却过程中, 米粉的粘滞性发生一系列变化所形成的粘滞性谱^[14]。由图 2 所示, 高温高湿环境下, 大米粉的 RVA 谱差异性比较大。高温高湿普通米桶中大米的峰值黏度在第 15 天时显著上升到 2 859 cP (CK 为 2 248 cP), 随后逐渐显著下降到第 30 天的 2 430 cP 和第 60 天的 1 991 cP ($P < 0.05$)。高温高湿负压米桶中大米的峰值黏度也存在类似的

表 2 不同贮藏环境和贮藏时间下大米常规理化品质的差异性分析^a

Table 2 The differences of conventional physicochemical quality of rice under different storage environments and time^a

贮藏环境	贮藏时间/天	水分/(g/100 g)	脂肪酸值/(mg/100 mg(以 NaOH 计))	食味值/分	直链淀粉/(g/100 g)	蛋白质/(g/100 g)
高温高湿普通米桶	CK	13.98±0.01H	2.74±0.23H	78±2AB	17.67±0.28AB	6.75±0.11
	15	14.92±0.03C	12.55±0.23E	73±1EF	16.96±0.18CD	6.93±0.03
	30	15.20±0.01A	20.92±0.89C	72±0EF	17.74±0.07AB	6.83±0.04
	60	15.07±0.05B	32.58±1.14A	71±1FG	17.52±0.11B	6.91±0.05
高温高湿负压米桶	15	14.04±0.01GH	5.65±0.23F	75±1CD	16.75±0.11D	6.91±0.11
	30	14.52±0.08D	14.10±0.19D	71±1F	17.41±0.31BC	6.90±0.09
	60	14.07±0.01F-H	26.65±0.27B	69±1G	16.72±0.58D	6.90±0.00
室温普通米桶	15	13.82±0.06I	4.34±0.23G	78±0B	16.81±0.02D	6.95±0.02
	30	14.07±0.00F-H	3.87±0.46G	78±0B	17.67±0.27AB	6.85±0.07
	60	13.65±0.03J	6.17±0.09F	78±1BC	16.90±0.27CD	6.82±0.08
室温负压米桶	15	14.08±0.04FG	3.36±0.19GH	80±1A	16.96±0.04CD	6.85±0.02
	30	14.35±0.04D	3.30±0.08GH	77±0BC	18.12±0.01A	6.85±0.21
	60	14.16±0.05F	5.66±0.23F	75±1DE	16.62±0.09D	6.82±0.01

注: ^a 每列数据后的大写字母表示不同贮藏环境和贮藏时间下的差异性显著, 显著性水平为 $P < 0.05$ 。

Note: ^a The different capital letters after each column of data indicate significant differences, and the significance level is $P < 0.05$.

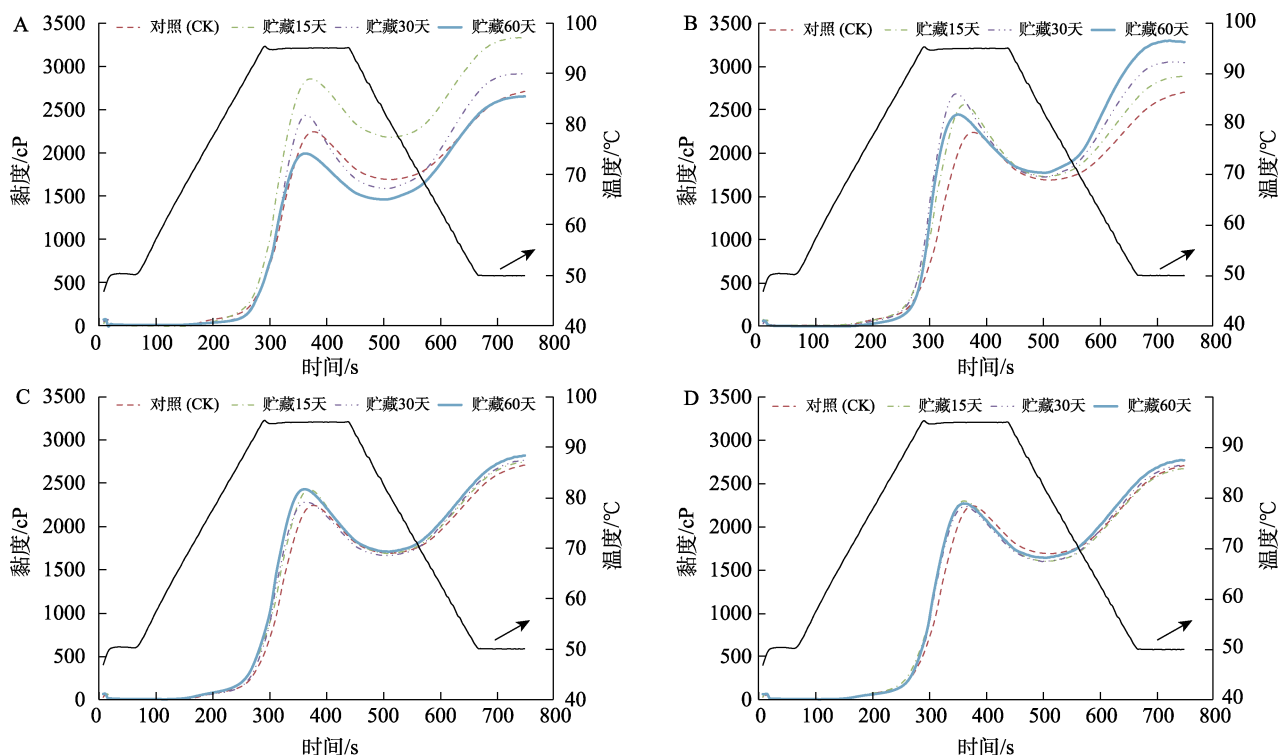
现象,即在贮藏前期(CK~第30天),峰值黏度逐渐显著升高(2 248 ~ 2 691 cP),随后下降到2 443 cP。从整体的变化上看,负压米桶中大米峰值黏度随时间的变化速度小于普通米桶大米峰值黏度的变化速度。这些均与先前的研究结果一致,表明短期内(普通米桶15天内、负压米桶30天内)的高温高湿环境使大米淀粉粒吸水膨胀能力变大,随着贮藏时间的进一步延长,其大米淀粉粒的吸水膨胀能力逐渐变弱^[2]。

对于最低黏度来说,只有高温高湿普通米桶的变化比较显著,其变化规律与峰值黏度的变化规律一致。这表明大米在高温高湿普通米桶贮藏15天后,其淀粉在高温下易被剪切,进而表现出较好的加工性能。高温高湿普通米桶大米的最终黏度随时间变化呈先上升(CK~15天,2 707~3 334 cP)后下降(15天~60天,3 334~2 650 cP)的趋势;而该贮藏环境下负压米桶大米的值随时间变化呈逐渐上升的趋势(CK~60天,2 707 ~

3 279 cP)。室温环境下,普通米桶贮藏15天和60天大米的峰值黏度(2 429 ~ 2 434 cP)显著高于贮藏新鲜大米和30天大米的峰值黏度(2 248 ~ 2 282 cP),而其大米的最终黏度随贮藏时间的增加呈现出逐渐下降的趋势($P < 0.05$)。据研究表明最终黏度高的大米煮成的米饭具有较高的硬度^[14],因此大米在高温高湿环境下贮藏时间越久,其米饭的质地越硬。

2.4 大米脂肪酸组成及含量的变化分析

龙粳31大米中的脂肪酸主要有油酸(1.76 mg/g)、亚油酸(3.43 mg/g)和棕榈酸(2.55 mg/g),此外还含有少量的肉豆蔻酸(0.15 mg/g)、硬脂酸(0.18 mg/g)和 α -亚麻酸(0.15 mg/g)(表3)。相关脂肪酸的组成和含量与其他研究结果一致^[15]。油酸和亚油酸分别约占总脂肪酸的21%和42%。当大米在高温高湿普通米桶中贮藏60天时间内,油酸、亚油酸和总脂肪酸含量随贮藏时间的延长而显著下降($P < 0.05$)。其中,油酸和亚油酸的



注: A. 高温高湿普通米桶; B. 高温高湿负压米桶; C. 室温普通米桶; D. 室温负压米桶。

Note: A. Ordinary rice bucket at high temperature and high humidity condition; B. Negative-pressed rice bucket at high temperature and high humidity condition; C. Ordinary rice bucket at room temperature condition; D. Negative-pressed rice bucket at room temperature condition.

图 2 不同贮藏环境和贮藏时间下大米粉的糊化特性曲线

Fig.2 Pasting properties of rice flour under different storage environments and time

表 3 不同贮藏环境和贮藏时间下大米脂肪酸组分和含量特征^aTable 3 The characteristics of fatty acids in rice under different storage environments and time^a

mg/g

贮藏环境	贮藏时间/天	肉豆蔻酸 C14:0	棕榈酸 C16:0	硬脂酸 C18:0	油酸 C18:1	亚油酸 C18:2	α -亚麻酸 C18:3	总脂肪酸
高温高湿 普通米桶	CK	0.15±0.00	2.55±0.02A-C	0.18±0.01A-C	1.76±0.05AB	3.43±0.06A-C	0.15±0.01AB	8.23±0.12A-D
	15	0.14±0.00	2.49±0.00C	0.18±0.00C	1.69±0.00CD	3.29±0.01E	0.15±0.00A-C	7.93±0.01E
	30	0.15±0.01	2.36±0.00D	0.16±0.00D	1.42±0.00E	3.03±0.01F	0.13±0.00C	7.26±0.00F
	60	0.15±0.01	2.27±0.01E	0.15±0.00E	1.12±0.01F	2.68±0.02G	0.13±0.00C	6.51±0.05G
高温高湿 负压米桶	15	0.16±0.01	2.62±0.01AB	0.19±0.00AB	1.80±0.00A	3.45±0.00AB	0.16±0.00A	8.38±0.02A-C
	30	0.16±0.00	2.56±0.03A-C	0.18±0.00A-C	1.71±0.04B-D	3.33±0.06C-E	0.15±0.00A-C	8.10±0.13C-E
	60	0.16±0.00	2.53±0.04BC	0.18±0.01BC	1.66±0.03D	3.29±0.06E	0.16±0.01AB	7.98±0.15DE
	15	0.15±0.00	2.64±0.03A	0.19±0.00A	1.79±0.00A	3.47±0.02AB	0.16±0.01AB	8.41±0.06AB
室温普通 米桶	30	0.16±0.01	2.57±0.05A-C	0.19±0.01A-C	1.75±0.04A-C	3.37±0.03B-E	0.15±0.01AB	8.18±0.10B-E
	60	0.14±0.00	2.54±0.01BC	0.19±0.00A-C	1.75±0.00A-C	3.37±0.01B-E	0.15±0.00AB	8.14±0.02B-E
室温负压 米桶	15	0.15±0.01	2.64±0.04A	0.19±0.00A	1.81±0.02A	3.53±0.04A	0.16±0.01AB	8.49±0.12A
	30	0.15±0.01	2.58±0.10A-C	0.19±0.00AB	1.75±0.05A-C	3.41±0.10B-C	0.15±0.01AB	8.23±0.27A-D
	60	0.14±0.00	2.50±0.03C	0.18±0.00A-C	1.70±0.01B-D	3.31±0.03DE	0.14±0.00BC	7.98±0.08DE
	15	0.15±0.00	2.64±0.03A	0.19±0.00A	1.79±0.00A	3.47±0.02AB	0.16±0.01AB	8.41±0.06AB

注：^a 每列数据后的大写字母表示不同贮藏环境和贮藏时间下的差异性显著，显著性水平为 $P < 0.05$ 。Note：^a The different capital letters after each column of data indicate significant differences, and the significance level is $P < 0.05$.

下降幅度分别高达 36%和 22%以上。因此，在大米贮藏过程中，控制油酸和亚油酸含量的下降显得尤为重要。高温高湿负压米桶中大米的油酸和亚油酸含量随贮藏时间延长也存在逐渐下降的趋势，其中贮藏 60 天大米中的含量（分别为 1.66 mg/g 和 3.29 mg/g）均分别显著低于贮藏 15 天内大米中的含量（分别为 1.80 mg/g 和 3.45 mg/g）（ $P < 0.05$ ）。对于室温环境下普通或负压米桶贮藏的大米来说，其脂肪酸组分和含量变化存在下降的趋势，但不显著。不饱和脂肪酸组分随贮藏时间的延长而含量下降的趋势与先前研究一致^[7]，主要原因可能是在贮藏过程中，高温高湿环境使稻米中的脂氧合酶活性增强，使大米中的不饱和/多不饱和脂肪酸降解而导致其含量的降低^[6]。因此，在南方梅雨天气时期，为了防止贮藏大米脂肪酸氧化酸败，要注意控制贮藏的温度、湿度和氧分压等因素。

2.5 基于雷达图的大米贮藏品质综合分析

在所有质量指标中，筛选出了 7 个差异比较显著的品质参数作为大米贮藏品质的关键性指标，分别是峰值黏度、最终黏度、最低黏度、脂肪酸值、油酸、亚油酸和食味值等。以新鲜大米为对照，其余贮藏时间的样品与之相比的增减量为基础进行无量纲化处理后，从贮藏环境和贮藏时间两个维度对大米贮藏品质变化进行雷达图可

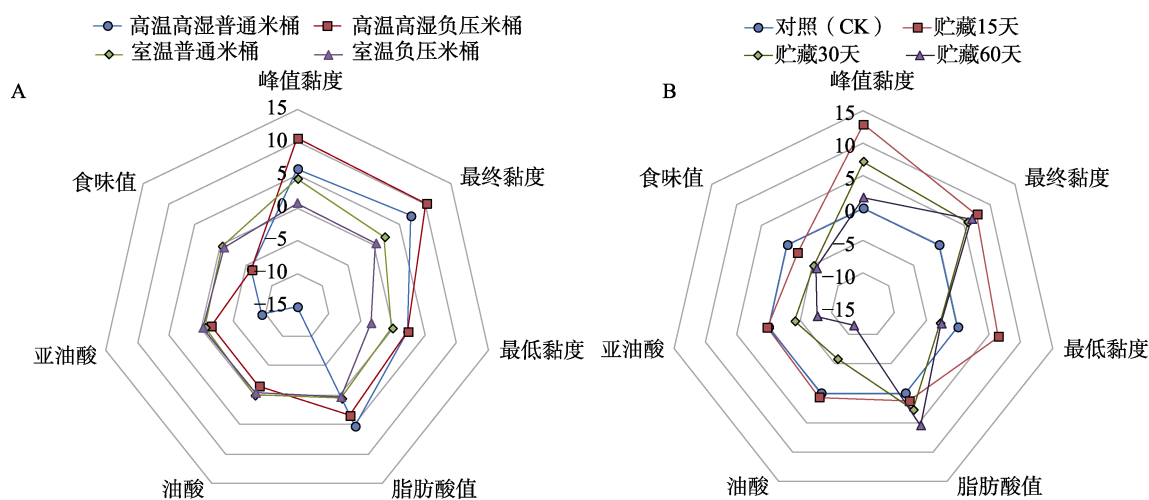
视化分析。

如图 3A 所示，高温高湿对大米品质指标的影响比室温对其的影响大。在高温高湿环境下，与负压米桶相比，普通米桶大米的脂肪酸值大大增高了，而油酸和亚油酸含量却大大降低了。造成这种现象的主要原因是普通米桶中有较高的氧气含量和温湿度，大米中游离不饱和脂肪酸更容易被氧化酸败，导致脂肪酸值升高^[16]。高温高湿负压米桶具有更高的峰值黏度和最终黏度，表明高温高湿环境和负压对米粉的糊化特性有一定的影响，具体的影响机制还有待于进一步的挖掘。高温高湿环境下，普通米桶和负压米桶对大米的最低黏度和食味值的影响一致。在室温环境下，普通米桶和负压米桶对大米脂肪酸值、油酸、亚油酸和食味值的影响不大，但普通米桶使大米米粉的峰值黏度和最终黏度升高了，负压米桶使米粉的最低黏度下降了。部分结果与先前研究结果一致^[17]，也进一步说明储藏过程中品质的变化可能受水稻品种影响，表明稻谷的储藏品质可以通过育种进行进一步的改良。

大米不同贮藏时间下品质的变化程度如图 3B 所示。对于米粉糊化特性来说，贮藏 15 天对其影响最大，主要表现在峰值黏度、最终黏度和最低黏度的提升上（分别提升 12%、7%和 6%以

上),这可能是由于前期有大量结合型水分子聚集于完整的淀粉颗粒周围^[18], α -淀粉酶活性下降,进而使淀粉颗粒液化程度降低^[19]。随着储藏时间的进一步延长,大米米粉的峰值黏度在第 15 天~第 60 天时间内逐渐下降,而最低黏度在第 30 天~第 60 天维持稳定。这可能是因为大米内部的结合水含量降低而外部水分难以渗透到细胞内,使大分子物质之间的交联逐渐趋于稳定导致淀粉颗粒膨胀受到抑制,峰值黏度的进一步降低^[18-19]。对于大米脂肪酸含量来说,脂肪酸值随大米贮藏时间的延长而逐步升高,而油酸和亚油酸含量随大

米贮藏时间的延长而逐步降低,尤其是第 15 天~第 60 天。对于米饭食味值来说,其值也随贮藏时间的延长而降低。有研究表明,食味值与稻谷峰值黏度呈正相关^[1],与蛋白质和硬度呈负相关^[20]。然而,本研究关于大米在不同贮藏时间的食味与峰值黏度关系与先前研究不一致,也进一步说明了稻米食味品质在贮藏过程中发生了非常复杂的变化,这可能与稻米脂肪酸值升高导致不愉快气味产生有关^[5],也可能与稻米淀粉精细结构的变化有关^[3],其食味品质的劣化机制还有待进一步的研究和验证。



注: A. 不同贮藏环境; B. 不同贮藏时间。

Note: A. different storage environment; B. different storage time.

图 3 大米贮藏品质的雷达分析图

Fig.3 Radar analysis of rice quality under storage

3 结论

本研究通过对 4 个不同贮藏环境(高温高湿普通米桶、高温高湿负压米桶、室温普通米桶和室温负压米桶)和 4 个不同贮藏时间下(CK、15 天、30 天和 60 天)龙粳 31 大米的外观、常规理化品质、脂肪酸组分和含量及米粉糊化特性等方面进行检测与分析,发现高温高湿和贮藏时间的延长能加速大米品质的劣化,并对峰值黏度、最终黏度、最低黏度、脂肪酸值、油酸、亚油酸和食味值等指标有显著性影响($P < 0.05$)。基于可视化雷达图对大米贮藏环境和贮藏时间两个维度上进行数据化及可视化统计与分析。结果表明,高温高湿普通米桶贮藏大米品质劣化的品质指标主要在脂肪酸值、油酸和亚油酸;高温高湿负压

米桶贮藏大米品质劣化的品质指标主要为峰值黏度和最终黏度;室温普通米桶和室温负压米桶贮藏大米品质劣化的品质指标分别为峰值黏度和最低黏度。不同贮藏时间上,峰值黏度和最低黏度呈现出先上升后下降的趋势,脂肪酸值持续升高,油酸和亚油酸含量在贮藏到一定时间后急剧下降,食味值逐渐降低。在普通和负压米桶的选择方面,结果表明短时间(15 天)的大米贮藏,采用负压米桶能更好地保持大米的品质特性;长时间(15 天以上)的大米贮藏,普通米桶和负压米桶无显著差别。另外,在南方梅雨天气期间,要注意大米贮藏的温湿度的干预和控制,以进一步维持大米的品质状况,提高大米的保质期限。大米贮藏过程中品质劣化是一个非常复杂的过程,

不仅受品种的影响,还受贮藏环境和贮藏时间的影响,其具体复杂的机理有待进一步的研究。本研究结果为大米贮藏品质形成机理和相关品质评价研究奠定了基础,也为耐储藏性大米品种的筛选和培育提供了技术支持。

参考文献:

- [1] 夏吉庆, 郑先哲, 刘成海. 储藏方式对稻米黏度和脂肪酸含量的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 11: 268-271.
XIA J Q, ZHENG X Z, LIU C H. Effects of storage methods on viscosity and fatty acid content of rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 11: 268-271.
- [2] 谢岚, 全珂, 刘艳兰, 等. 贮藏温度和时间对籼稻糊化特性的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(2): 129-133+170.
XIE L, QUAN K, LIU Y L, et al. Effects of storage temperature and duration on pasting properties of Indica rice[J]. Food & Machinery, 2020, 36(2): 129-133+170.
- [3] ZHU D W, LI M, FANG C Y, et al. Effects of storage on the starch fine structure and physicochemical properties of different rice variety types[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 300: 120273.
- [4] 张学亮, 张高鹏, 莫菊, 等. 大米储藏过程品质控制与有害生物防治新技术[J]. 粮食加工, 2022, 47(1): 51-55.
ZHANG X L, ZHANG G P, MO J, et al. New techniques for quality control and pest control during rice storage[J]. Grain Processing, 2022, 47(1): 51-55.
- [5] 曲清莉, 傅茂润, 代红飞. 脂氧合酶(LOX)在脂肪酸氧化中的作用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(10): 137-142.
QU Q L, FU M R, DAI H F. Research progress of effect of lipoygenase (LOX) on fatty acid oxidation[J]. Food Research and Development, 2015, 36(10): 137-142.
- [6] DEKA S C, SOOD D R, GUPTA S K. Effect of storage on fatty acid profiles of basmati rice (*Oryza sativa* L.) genotypes[J]. Journal of Food Science and Technology-mysore, 2000, 37(3): 217-221.
- [7] SHI J Y, WU M D, QUAN M M. Effects of protein oxidation on gelatinization characteristics during rice storage[J]. Journal of Cereal Science, 2017, 75: 228-233.
- [8] RAMEZANZADEH F M, RAO R M, WINDHAUSER M, et al. Prevention of oxidative rancidity in rice bran during storage[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1999, 47 (8): 2997-3000.
- [9] 林秀桩, 魏子文, 廖志敏, 等. 烟包全息印刷品的目视色差评价和色差阈值研究[J]. 印刷与数字媒体技术研究, 2022, 22(6): 45-52+101.
LIN X Z, WEI Z W, LIAO Z M, et al. Evaluation of visual color difference and color difference threshold based on cigarette holographic prints[J]. Printing and Digital Media Technology Study, 2022, 22(6): 45-52+101.
- [10] 国家标准. 稻谷储存品质判定规则: GB/T 20569—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
National Standard. Guidelines for evaluation of paddy storage character: GB/T 20569—2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [11] HUANG Y, LAI H. Characteristics of the starch fine structure and pasting properties of waxy rice during storage[J]. Food Chemistry, 2014, 152: 432-439.
- [12] YI C, ZHU H, BAO J, et al. The texture of fresh rice noodles as affected by the physicochemical properties and starch fine structure of aged paddy[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 130: 109610.
- [13] GU F, GONG B, GILBERT R G, et al. Relations between changes in starch molecular fine structure and in thermal properties during rice grain storage[J]. Food Chemistry, 2019, 295: 484-492.
- [14] 包劲松. 稻米淀粉品质遗传与改良研究进展[J]. 分子植物育种, 2007(1): 1-20.
BAO J S. Progress in studies on inheritance and improvement of rice starch quality[J]. Molecular Plant Breeding, 2007(1): 1-20.
- [15] 邵雅芳. 稻米的营养功能特点[J]. 中国稻米, 2020, 26(6): 1-11.
SHA Y F. Nutritional and functional characteristics of rice grain [J]. China Rice, 2020, 26(6): 1-11.
- [16] 陈玮. 大米气调储藏过程中脂质的变化研究[D]. 天津科技大学, 2007.
CHEN W. Studies on lipid of modified atmosphere storage for rice[D]. Tianjin University of Science and Technology, 2007.
- [17] 陈业坚, 舒庆尧, 张增勤, 等. 稻谷储藏时间对稻米品质影响的研究[J]. 作物研究, 2001, 4: 9-11.
CHEN Y J, SHU Q Y, ZHANG Z Q, et al. Effects of storage on dehulled rice quality[J]. Crop Research, 2001, 4: 9-11.
- [18] 王邓琳, 熊银, 王月慧. 富硒稻谷在 35℃下储藏品质、糊化特性及食用品质的变化规律[J]. 食品科学, 2023, 1-14.
WANG D L, XIONG Y, WANG Y H. Changes in storage quality, gelatinization characteristics and edible quality of selenium-rich rice at 35℃[J]. Food Science, 2023, 1-14.
- [19] SIWGH N, SHECKAN K, KAUR A, et al. Characteristics of starch obtained at different stages of purification during commercial wet milling of maize[J]. Starch-Starke, 2014, 66(7-8): 668-677.
- [20] KIM H, KIM O W, KWAK H S, et al. Prediction model of rice eating quality using physicochemical properties and sensory quality evaluation[J]. Journal of sensory Studies, 2017, 32(4): e12273 

备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。