

郑海英, 朱燕丽, 钟秋夏, 等. 包装材料对紫米贮藏品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(7): 234-243. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022060141

ZHENG Haiying, ZHU Yanli, ZHONG Qiuxia, et al. Effect of Packaging Materials on the Storage Quality of Purple Rice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(7): 234-243. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022060141

· 包装与机械 ·

# 包装材料对紫米贮藏品质的影响

郑海英<sup>1</sup>, 朱燕丽<sup>1</sup>, 钟秋夏<sup>1</sup>, 范小平<sup>1\*</sup>, 黄 苇<sup>1</sup>, 郑经绍<sup>2</sup>

(1. 华南农业大学食品学院, 广东广州 510642;

2. 新兴县微丰农业科技有限公司, 广东云浮 527400)

**摘要:** 紫米在储藏过程中易受内部及外部因素如温度、湿度、氧气等的影响, 合适的包装能有效抑制紫米的陈化与霉变, 本研究通过使用四种不同阻隔性的包装材料 AL/PE、PA/PE 单面压纹、PA/PE、PE/EVOH/PA/PE 对紫米进行包装后储藏 98 d, 储藏期间定期测定紫米的水分含量、脂肪酸值、蛋白质含量、霉菌数量、电导率、色价、色差、电子鼻气味、形态结构等指标的动态变化并对各指标进行相关性分析。结果表明, 各材料包装的紫米的水分含量有不同程度的上升而后下降、电导率先增加后降低、 $\Delta E$ 、脂肪酸值不断增大, 蛋白质含量小幅上升后不断下降, 霉菌含量先增加后减少至稳定, 电子鼻能明显区分不同储藏期及不同包装材料中的紫米。从水分含量、 $\Delta E$ 、色价、脂肪酸值、形态结构指标来看, 高阻隔材料 PE/EVOH/PA/PE 包装的紫米品质较稳定, 从霉菌含量、电导率指标来看, PA/PE 单面压纹材料包装的紫米品质较稳定。

**关键词:** 紫米, 包装材料, 阻隔性, 保鲜, 糙米

中图分类号: TS205

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)07-0234-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022060141

本文网刊:



## Effect of Packaging Materials on the Storage Quality of Purple Rice

ZHENG Haiying<sup>1</sup>, ZHU Yanli<sup>1</sup>, ZHONG Qiuxia<sup>1</sup>, FAN Xiaoping<sup>1\*</sup>, HUANG Wei<sup>1</sup>, ZHENG Jingshao<sup>2</sup>

(1. College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;

2. Xinxing Weifeng Agricultural Science and Technology Co., Ltd., Yunfu 527400, China)

**Abstract:** Purple rice is susceptible to the influence of internal and external factors such as temperature, humidity and oxygen during storage, and proper packaging can effectively inhibit aging and mildew of purple rice. In this study, purple rice was packed and stored for 98 days using four packaging materials with different barrier properties, AL/PE, PA/PE single-sided embossed, PA/PE, PE/EVOH/PA/PE, and the dynamic changes of moisture content, fatty acid value, protein content, mold count, electrical conductivity, color value, color difference, E-nose odor, morphological structure and other indicators of purple rice were measured periodically during storage and correlation analysis was performed for each indicator. The results showed that the moisture content of purple rice increased and then decreased, the conductivity increased and then decreased, the  $\Delta E$  and fatty acid value increased, the protein content increased slightly and then decreased, the mold count increased and then decreased to stable, and the electronic nose could significantly distinguish purple rice in different storage periods and different packaging materials. From the moisture content,  $\Delta E$ , color value, fatty acid value and morphological structure indexes, the quality of purple rice packed with high barrier material PE/EVOH/PA/PE was more stable, and from the indexes of mold count and conductivity, the quality of purple rice packed with PA/PE single-sided embossed material was more stable.

**Key words:** purple rice; packaging materials; barrier; preservation; brown rice

水稻是世界主要粮食作物之一, 与小麦、玉米和 马铃薯等作物被世界一半以上的人口食用<sup>[1]</sup>, 紫米,

收稿日期: 2022-06-16

基金项目: 2020 年广东省现代农业产业园项目“云浮市新兴县丝苗米产业园”。

作者简介: 郑海英 (1994-) (ORCID: 0000-0002-3271-9330), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与包装, E-mail: 289003224@qq.com。

\* 通信作者: 范小平 (1981-) (ORCID: 0000-0001-7881-7676), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品加工与包装, E-mail: fanxiaoping@scau.edu.cn。

俗称“紫珍珠”,是有色稻的一种<sup>[2]</sup>,在广东、云南、广西等多个省份均有种植,通常来说,紫米主要以糙米的形式生产,所以米粒含有完整的胚乳、麸皮和胚芽,紫米中营养物质如蛋白质、赖氨酸等含量比白米高,因此紫米相对于白米而言更有营养<sup>[3]</sup>。紫米的麸皮层含有丰富的花青素,花青素的浓度会影响紫色素、黑色素合成使得米粒具有不同深浅的颜色<sup>[1]</sup>。紫米富含的花青素、类黄酮、生物碱等生物活性物质,具有清除自由基、抗氧化、降血脂、降低胆固醇含量、抗癌、抗炎、抗过敏、抗糖尿病等的功能<sup>[4]</sup>。由于糙米的麸皮层直接暴露于环境中,受微生物感染,酶活性会增加,脂类物质发生氧化,导致糙米的品质下降<sup>[5]</sup>,因此储藏过程中适宜的包装对于维持紫米的食用品质和延长货架期具有重要的意义。

国内外对大米和糙米的包装材料主要有纸袋、塑料编织袋、复合塑料袋,少数还在包装中添加纳米材料,配合抽真空、充氮气、充二氧化碳等方式进行包装<sup>[6]</sup>。目前常用的高阻隔性包装材料有乙烯-乙烯醇共聚物(EVOH)、聚偏二氯乙烯(PVDC)、聚对苯二甲酸(PET)、聚酰胺(PA)、聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)等。塑料编织袋是最简单的一种包装方式,但是编织袋不具备良好的阻隔性能,使用后大米霉变的概率大幅度增加<sup>[7]</sup>,复合塑料袋将不同功能的塑料薄膜结合使用,利用各种塑料薄膜的优点,赋予复合包装膜更佳的功能特性,能较好阻隔大米与外界环境以减缓品质劣变<sup>[8]</sup>。Norkaew 等<sup>[9]</sup>探究了采用 PA/LLDPE 和铝袋对黑糙米进行气调包装(空气、真空、氮气),充氮气的 PA/LLDPE 包装材料对黑糙米的花青素和酚酸等保留效果更好,异味物质的产生更少,说明包装能有效延缓黑米的品质劣变。

目前国内外对紫米包装保鲜探究较少,本研究经过对市面成熟的复合塑料膜进行氧气透过率和水蒸气透过率测定后,根据测定的氧气透过率高低选择了四种不同阻隔性材料,分别是 PA/PE 单面压纹、PA/PE、AL/PE、PE/EVOH/PA/PE 材料,PA 复合材料价格较低、耐磨、印刷性能较好,但氧气透过率较高,铝箔复合材料具有良好的光阻隔性,EVOH 复合材料韧性好,对气体、有机溶剂等有较好的阻隔性<sup>[10]</sup>。因此,本文采用四种材料对紫米进行真空包装后置于 35 ℃ 的高温下储藏加快紫米品质陈化,探究其在储藏过程中品质与时间的变化关系,为紫米包装储藏提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

紫糙米 广东云浮市新兴县微丰农业科技有限公司提供,品种为“天紫 1 号”,采收于 2021 年;包装材料为 AL/PE、PA/PE、PA/PE 单面压纹、PE/EVOH/PA/PE 1 kg 米砖袋 市购,表 1 为参照 GB/T 1038-2000 塑料薄膜和薄片气体透过性试验方法<sup>[11]</sup>和 GB/T 16928-1997 包装材料试验方法 透湿率<sup>[12]</sup>测定

的四种包装材料的厚度、氧气透过率、水蒸气透过率。无水乙醇 分析纯,上海凌峰化学试剂有限公司;氯化钠 分析纯,上海润捷化学试剂有限公司;活性炭 分析纯,台山市粤侨试剂塑料有限公司;丙三醇 分析纯,国药集团化学试剂有限公司;盐酸、磷酸 分析纯,广州化学试剂厂;孟加拉红培养基 广东环凯微生物科技有限公司;氢氧化钠标准滴定液 以达科技(泉州)有限公司;考马斯亮蓝、牛血清白蛋白 上海伯奥生物科技有限公司。

表 1 四种包装材料的参数  
Table 1 Parameters of four kinds of packaging materials

材料	厚度 ( $\mu\text{m}$ )	氧气透过率 ( $\text{cm}^3/\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h} \cdot 0.1 \text{ MPa}$ )	水蒸气透过率 ( $\text{g}/\text{m}^2 \cdot 24 \text{ h}$ )
AL/PE	112.1	8.450	2.419
PA/PE单面压纹	92/212.8	47.485/29.782	5.245/4.055
PA/PE	110	38.576	2.7165
PE/EVOH/PA/PE	105.7	2.247	1.866

超净工作台 苏州净化设备有限公司; LDZX-50L 立式高压蒸汽灭菌锅 上海申安医疗器械厂; LHS-250SC 恒温恒湿箱 上海齐欣科学仪器有限公司; 202-0AB 型电热恒温干燥箱 绍兴市苏铂仪器有限公司; PHS-3C pH 计、DDS-11A 电导率仪 上海仪电科学仪器股份有限公司; FD-5BT 分光光度计 柯尼卡美能达公司; PEN3 电子鼻 德国 Airsense 公司; UV-4802S 紫外可见分光光度计 尤尼柯(上海)仪器有限公司; TG16-WS 离心机 湘潭湘仪仪器有限公司; SHZ-D(III)循环水式真空泵 巩义市予华仪器有限公司; WBL10225 破壁机 广东美的公司; EVO MA 15 扫描式电子显微镜 德国 Carl Zeiss 集团; DZ-500B 真空包装机 广州瑞宝包装机械有限公司; SHA-CA 恒温水浴振荡器 常州澳华仪器有限公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 紫米包装 将紫米按 400 g/包装进上述包装材料中,对其进行抽真空后封口,各封装 10 袋,置于  $35 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[13]</sup>,  $65\% \pm 5\%$  RH 恒温恒湿箱中加速陈化储藏,每隔 14 d 进行取样测定各品质指标,总储藏周期为 98 d。

1.2.2 水分测定 水分测定参照 GB 5009.3-2016 干燥法<sup>[14]</sup>进行。

1.2.3 霉菌含量测定 霉菌含量测定参照 GB 4789.15-2016 霉菌和酵母菌计数<sup>[15]</sup>进行。

1.2.4 气味变化 气味变化参照彭旭怡等<sup>[16]</sup>的研究方法,取 30 g 紫米,置于 100 mL 的烧杯中,在 30 ℃ 的恒温培养箱中顶空 2 h,期间每隔半小时摇晃一次。用便携式电子鼻检测系统(Airsense PEN3, German)测定大米的气味变化,电子鼻参数为:采样间隔 1 s,冲洗时间 120 s,调零时间 10 s,预采样时间 5 s,检测时间 120 s,载气流速、进样流速 300 mL/min,

每种样品重复测3次。选取80~85 s的响应值进行主成份分析(PCA)和Loadings分析。电子鼻传感器性能描述见表2。

表2 电子鼻传感器性能描述  
Table 2 Electronic nose sensore and their responses to the substances

阵列序号	传感器名称	性能描述
1	W1C	芳香成分
2	W5S	灵敏度大,对氮氧化合物很灵敏
3	W3C	氨水,对芳香成分灵敏
4	W6S	主要对氢气有选择性
5	W5C	烷烃芳香成分
6	W1S	对甲烷灵敏
7	W1W	对硫化物灵敏
8	W2S	对乙醇灵敏
9	W2W	芳香成分,对有机硫化物灵敏
10	W3S	对烷烃灵敏

1.2.5 蛋白质测定 蛋白质测定采用考马斯亮蓝法<sup>[17]</sup>。具体步骤如下:

取粉碎过40目的紫米粉0.5 g,置于研钵中,加入8 mL 0.1 mol/L NaOH,研磨成匀浆,转入50 mL 离心管,静置30 min,期间每隔10 min振荡一次,3500 r/min,离心15 min,上清液转入50 mL 容量瓶中,用蒸馏水定容至刻度线,摇匀,得碱溶性蛋白待测液。沉淀物中加入8 mL 7%乙醇提取,操作步骤同上,得醇溶性蛋白待测液。

吸取待测液0.3 mL置于15 mL试管中,加入15 mL考马斯亮蓝溶液,混合均匀,放置2 min后,用1 cm玻璃比色皿在595 nm波长测定吸光度,同时用牛血清蛋白的不同梯度溶液替代待测液测定标准曲线,记录吸光度值,在标准曲线上查出对应的蛋白质的含量,蛋白质标准曲线 $y=9.2301x+0.0731$ , $R^2=0.9971$ 。

计算方法:

$$X = \frac{m_1 \times V_1}{V_2 \times m_2 \times 1000} \times 100$$

式中: X为试样中蛋白质的含量(g/100 g), $m_1$ 为从标准曲线中查得的蛋白质的质量(mg), $V_1$ 为最终样液的定容体积(mL), $V_2$ 为测定时所取待测液的体积(mL), $m_2$ 为研磨试样的质量(g)。

1.2.6 电导率测定 参照周显青等<sup>[18]</sup>的研究方法,具体步骤如下:随机挑选40颗完整的紫米,称量质量W,用蒸馏水冲洗3遍,用滤纸吸干浮水后放入100 mL的烧杯中,加入50 mL蒸馏水,加盖保鲜膜,在30 ℃的水浴锅中保温13 h,同时做空白对照。取出冷却至室温(25 ℃)后用电导率仪测定浸泡液的电导率。

计算方法:

$$\text{电导率} = (C_1 - C_2) / W$$

式中: $C_1$ 为浸泡液的电导率( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), $C_2$ 为空白对照的电导率( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ),W为紫米的质量(g)。

1.2.7 色差测定 色差测定参照张玉荣等<sup>[19]</sup>的方法。具体步骤如下:将紫米粉碎后过40目筛,混合均匀的紫米粉置于一次性培养皿中压实后作为待测样。用FD-5BT分光密度计选用 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 模式测样品,以 $\Delta E$ 作为糙米色泽的评价指标<sup>[20]</sup>, $\Delta E$ 由 $\Delta L^*$ 、 $\Delta a^*$ 、 $\Delta b^*$ 三者的平方和开平方得到。每个样品随机测定3次。

1.2.8 色价测定 色价测定参照黑米测定方法<sup>[21]</sup>。具体步骤如下:称取1 g紫糙米(精确到0.01 g)置于具塞锥形瓶中,加入100 mL 1.5 mol/L HCl-95%乙醇溶液(HCl/乙醇=15/85),在80 ℃恒温水浴中浸提1 h。浸提完毕,冷却至室温并用滤纸过滤至100 mL容量瓶,定容后在535 nm测其Abs值。

计算方法:

$$E_{1\text{ cm}, l=\max 535\text{ nm}}^{1\%} = \frac{A \times R}{W}$$

$E_{1\text{ cm}, l=\max 535\text{ nm}}^{1\%}$ 即1 g紫米所含色素溶于100 mL酸性乙醇溶液,选用1 cm比色皿,在最大吸收波长535 nm处测得的吸光度(Abs),A为测试液的吸光度值,R为色素提取液的稀释倍数,W为样品的质量(g)。

1.2.9 脂肪酸值测定 脂肪酸参照稻谷储存品质判定规则<sup>[22]</sup>和粮油检验 谷物及制品脂肪酸值<sup>[23]</sup>。具体步骤如下:取过40目筛的紫米粉待测样品,称取10 g置于250 mL的具塞锥形瓶中,加入50 mL无水乙醇,振摇30 min后加入0.5 g活性炭,静置5 min后转移至50 mL离心管中,用冷冻离心机,25 ℃,3500 r/min离心10 min后,收集上清液25 mL以上作为待测液。吸取25 mL的待测液置于200 mL的烧杯中,加入50 mL去 $\text{CO}_2$ 的蒸馏水(加盖加热10 min),加盖保鲜膜后放入校准的pH计的复合电极,用氢氧化钾标准滴定液滴定至pH为8,同时测定空白对照样,以中和100 g样品中游离脂肪酸所需的氢氧化钾毫克数表示。

计算方法:

$$S = (V_1 - V_0) \times c \times 56.1 \times \frac{50}{25} \times \frac{100}{m(100 - \omega)} \times 100$$

式中:S为100 g紫糙米中游离脂肪酸所需氢氧化钾毫克数(mg/100 g), $V_1$ 为滴定试样消耗氢氧化钾溶液的体积(mL), $V_0$ 为空白对照消耗氢氧化钾溶液的体积(mL),c为氢氧化钾标准滴定液的浓度(mol/L),50为无水乙醇加入的体积(mL),25为滴定试样的体积(mL),100为换算为100 g干试样的质量(g),m为试样的质量(g), $\omega$ 为试样中水分质量(g)。

1.2.10 胚乳结构观察 随机选取完整的紫米,放置在贴有导电胶的样品台上,在离子溅射仪上镀金膜后,用扫描电镜观察,电压为10 kV,放大100倍,观察后进行拍照。

### 1.3 数据处理

除霉菌含量外, 其他指标无异常值重复测定三次, 结果取平均值。数据采用 Excel 2021、OriginPro 9.0、SPSS 24.0、Winmuster 软件进行统计与分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 水分变化

水分对于维持紫米的品质有着重要的作用, 水分不仅会影响微生物的生长, 还会影响脂肪酸值的变化<sup>[15]</sup>, 保持紫米稳定的含水量有利于维持紫米的食用品质; 紫米水分含量的变化与米粒本身的呼吸和代谢有关, 也与包装材料有关<sup>[24]</sup>。图 1 为不同包装材料对紫米加速储藏 98 d 水分含量变化趋势的影响, 四种包装中的紫米的水分含量随储藏时间的增加整体呈先上升后下降的趋势。四款包装中紫米的水分含量在 0~42 d 呈上升趋势, 可能是由于高温引起的水分迁移混乱, 吸附水向自由水迁移, 导致自由水的水分含量增加<sup>[25]</sup>, 42~98 d AL/PE 材料和 PA/PE 材料中的含水量稍微下降后上升, PA/PE 单面压纹材料中的水分含量呈下降后趋于平稳的趋势, PE/EVOH/PA/PE 材料中的水分含量在 56 d 达到最高后下降后趋于平稳, 从图中趋势可以看出 PA/PE 材料、AL/PE 材料内紫米的水分含量波动都比较大, PA/PE 单面压纹材料、PE/EVOH/PA/PE 材料中的水分含量波动较小。水分含量对于维持米粒的品质、控制微生物生长和繁殖及其他物理特性起着非常重要的作用, 四款不同阻隔性的包装材料中, PE/EVOH/PA/PE 材料的水蒸气透过率最低, 对于维持紫米的水分含量效果最好。

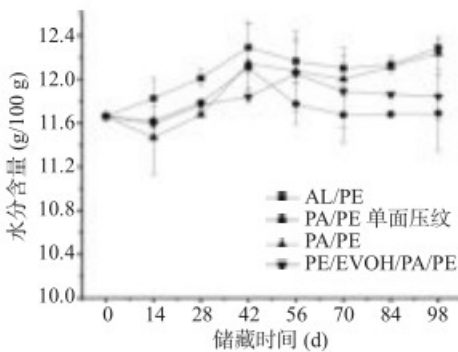


图 1 不同包装材料中紫米加速储藏 98 d 水分含量的变化  
Fig.1 Changes of moisture content of purple rice in different packaging materials during 98 days accelerated storage

### 2.2 霉菌含量的变化

紫米在储藏期间, 由于失去了稻壳的保护, 极易被霉菌所感染, 霉菌通过消耗米粒的营养物质并产生代谢物质, 影响紫米的品质<sup>[10]</sup>。图 2 为不同包装材料中紫米加速储藏 98 d 霉菌含量的变化, 储藏初期紫米中霉菌含量为 10 CFU/g, 储藏过程中, 四种包装材料中的霉菌数量呈先上升后下降的趋势, 与藏苡等研究结果一致<sup>[10]</sup>, 由于糙米的表层营养物质比较丰富, 储藏 0~56 d 霉菌数量有所增加, 是由于霉菌消耗

紫米表层的营养物质, 霉菌含量逐渐增加至最高点, 而从 56~98 d, 由于营养物质消耗, 霉菌生长被抑制, 霉菌含量逐渐减少<sup>[20]</sup>。储藏过程中, PA/PE 单面压纹材料中紫米的霉菌含量变化浮动较小, 最高是在 28 d, 霉菌含量为 20 CFU/g, 对霉菌的抑制效果最好, 可能是由于其水分含量保持在比较低的状态, 水分含量低, 米粒的呼吸作用较低, 微生物的生物活性有所抑制, PA/PE 材料的氧气透过率为四个包装中最大, 所包装的紫米的霉菌含量变化浮动最大, 最高是在 56 d, 霉菌含量为 100 CFU/g, PE/EVOH/PA/PE 与 AL/PE 的变化趋势相似, 储藏末期霉菌含量均为 15 CFU/g, 阻隔性更高的 PE/EVOH/PA/PE、AL/PE、PA/PE 单面压纹材料较 PA/PE 的抑菌效果更好, 说明包装材料的阻隔性对霉菌生长有重要影响。

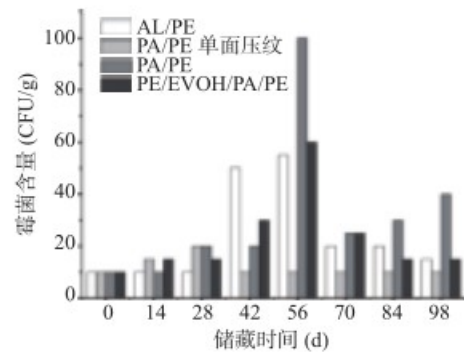


图 2 不同包装材料中紫米加速储藏 98 d 霉菌含量的变化  
Fig.2 Changes of mold count of purple rice in different packaging materials during 98 days accelerated storage

### 2.3 气味变化

Loadings 分析与 PCA 分析是相关的, 均是通过观察传感器在横纵坐标轴上的响应值, 位置距离原点越远, 其负载的参数值越大, 说明传感器在评价样品品质中起到的作用越大<sup>[26]</sup>。由图 3、图 4 可知第一主成分(PC1)和第二主成分(PC2)的贡献率分别为 92.89% 和 5.70%, 总贡献率为 98.59%, 超过 85.00%, 可以代表紫米样品的整体气味<sup>[27]</sup>。由图 3 可见 W1W 和 W5S 在检测中作用最大, 贡献率最高。如表 2 所示, W1W 传感器对硫化物灵敏, W5S 传感器对氮氧化物灵敏。从图 4 的 PCA 图可以看出, 电子鼻的

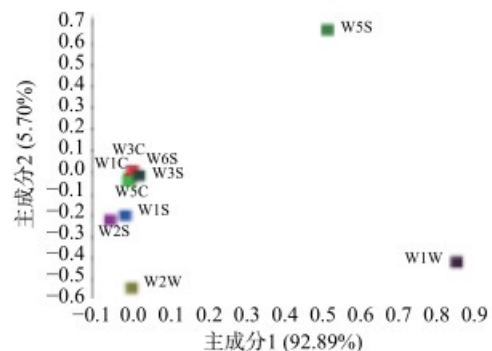


图 3 不同包装材料中紫米加速储藏 98 d 的载荷图  
Fig.3 Loadings diagram of 98 days accelerated storage of purple rice in different packaging materials

W1W 传感器能够区分不同储藏时期的紫米,但是同一时期不同包装材料中紫米的响应值相差不大,较难区分,W5S 传感器能够区分不同储藏时期和不同包装中的紫米气味的变化。在储藏过程中,四个包装内紫米中的硫化物随着储藏时间的增加先增多后减少,氮氧化合物随着储藏时间的增加先增多后减少,储藏末期增加。氮氧化合物的变化是由于脂肪、氨基酸等降解为酮类、醛类等物质<sup>[28]</sup>。

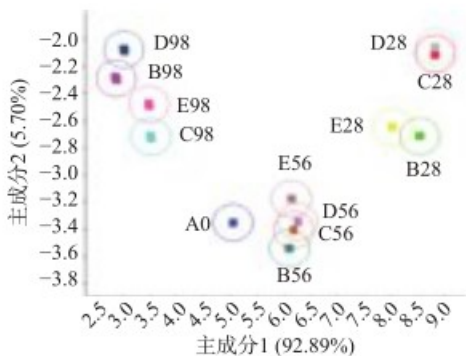


图 4 不同包装材料中紫米加速储藏 98 d 的 PCA 图

Fig.4 PCA diagram of 98 days accelerated storage of purple rice in different packaging materials

注: A 为 0 d, B、C、D、E 分别为 AL/PE、PA/PE 单面压纹、PA/PE、PE/EVOH/PA/PE。

### 2.4 蛋白质变化

紫米中含有丰富的蛋白质,较普通白米的含量高 23%<sup>[29]</sup>。战旭梅<sup>[30]</sup>探究不同品种稻谷在 38 °C 储藏 9 个月后发现,除武粳 14 储藏后蛋白质含量基本不变外,其他品种蛋白质含量都有所降低。图 5 是不同包装材料中紫米加速储藏 98 d 蛋白质的变化。储藏过程中,四种包装材料中紫米的蛋白质呈小幅增加后逐渐下降的趋势。赵学伟等<sup>[31]</sup>研究发现,陈化后的大米,总蛋白以及清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白和谷蛋白的提取率都降低。蛋白质测定过程中,考马斯亮蓝 G20 主要与蛋白质中的碱性氨基酸和芳香族的氨基酸残基疏水相互作用结合<sup>[17]</sup>。在温度、氧气、水分等影响下,蛋白质被氧化,导致蛋白质的空间结构发生变化,蛋白质与淀粉之间交联程度增加,蛋白质在淀粉周围形成了网络结构<sup>[32]</sup>,另外脂质氧化产生的

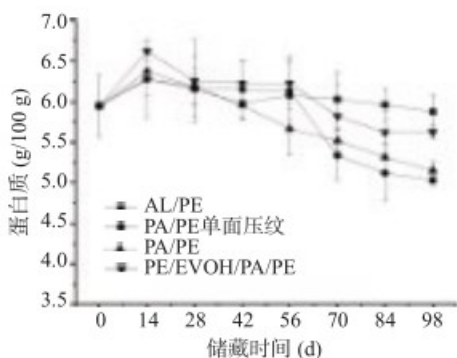


图 5 不同包装材料中紫米加速储藏 98 d 蛋白质的变化

Fig.5 Changes of protein of purple rice in different packaging materials during 98 days accelerated storage

过氧化物和碳基化合物会通过巯基和二硫键与蛋白质结合<sup>[7]</sup>,导致蛋白质的含量下降。整个储藏过程中,AL/PE 材料和 PE/EVOH/PA/PE 材料对于维持蛋白质的含量效果较好,而 PA/PE 单面压纹材料与 PA/PE 材料中紫米蛋白质含量下降比较严重,材料的阻隔性高,对于维持蛋白质含量效果较好。

### 2.5 电导率变化

细胞膜发挥隔离环境与细胞的作用,它影响细胞代谢过程的酶活性,调节细胞之间的物质传递。随着储藏时间的增加,稻谷细胞膜通透性增大,其细胞电解质渗漏,导致电导率增加<sup>[33]</sup>。图 6 为不同包装材料中紫米加速储藏 98 d 电导率的变化,整体呈波动上升后下降的趋势,这与姚亚静采用真空包装糙米储藏过程中的电导率变化趋势一致<sup>[34]</sup>,其中 PA/PE 单面压纹材料中紫米的电导率的波动最小,从初始的 66.90  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$  到 56 d 达到最高的 86.13  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ ,储藏末期 98 d 时为 67.33  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ 。PE/EVOH/PA/PE 中紫米的电导率波动浮动较大,最高点在 56 d 时为 90.46  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ ,储藏末期 98 d 时为 73.58  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ ; AL/PE 材料中紫米的电导率最高点在在 56 d 时为 90.47  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ ,储藏末期 98 d 时为 73.68  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ ; PA/PE 材料中的紫米在储藏末期 98 d 电导率最高,为 78.00  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ 。可见,PA/PE 单面压纹材料对于维持紫米的电导率效果最好。

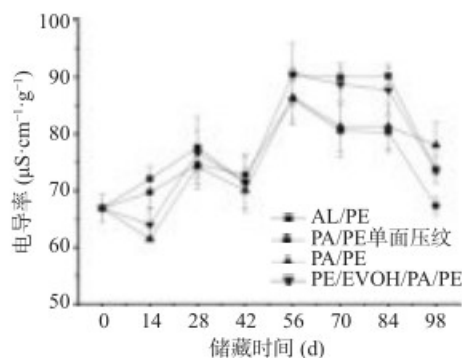


图 6 不同包装材料中紫米加速储藏 98 d 电导率的变化

Fig.6 Changes of electrical conductivity of purple rice in different packaging materials during 98 days accelerated storage

### 2.6 色差变化

受光照、水分和气体变化的影响,紫米中的花青素、脂肪酸值、蛋白质等营养物质会发生酶促褐变<sup>[24]</sup>、非酶促褐变、垩白<sup>[35]</sup>等使得其色差发生改变,加速储藏选用的 35 °C 也加快了色泽的变化,可能是由于温度接近脂肪酶活性的最佳温度<sup>[36]</sup>,本文选用  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  色彩空间测定紫米的色差变化,  $\Delta E$  值越大,紫米的色泽变化越大,当  $\Delta E < 1.5$  时、 $1.5 < \Delta E < 3.0$ 、 $3.0 < \Delta E < 6.0$  分别代表样品与储藏前样品颜色对比无差异、稍有差异、有显著差异。由图 7 可知四种包装内紫米的  $\Delta E$  值均随着储藏时间的延长而增大,第 0~70 d  $\Delta E$  值增加较快,从第 70 d 至储藏末期增

加速度减缓。从相关性分析可知,AL/PE 材料、PA/PE 单面压纹材料、PA/PE 材料中紫米的 $\Delta E$ 与水分含量极显著相关,说明此时水分含量对色差的影响较大。除此之外,由于不同材料的氧气透过率和水蒸气透过率不同,使得紫米的各类物化反应如蛋白质氧化、脂肪氧化等程度不同,导致不同的色泽变化<sup>[37]</sup>,AL/PE 和 PA/PE 中紫米的 $\Delta E$ 在第 42 d 的时超过 3.0;PA/PE 单面压纹和 PE/EVOH/PA/PE 中紫米的 $\Delta E$ 在第 56 d 超过了 3.0,说明此时紫米颜色较取样前稍有差异。后续储藏过程中,四种包装内的紫米的 $\Delta E$ 均大于 3.0,色差已经有明显差异。储藏到 98 d 时,AL/PE、PA/PE、PA/PE 单面压纹的 $\Delta E$ 为 5.42、5.54、5.54,PE/EVOH/PA/PE 的 $\Delta E$ 为 5.07,保持在最低,总色差变化最小。

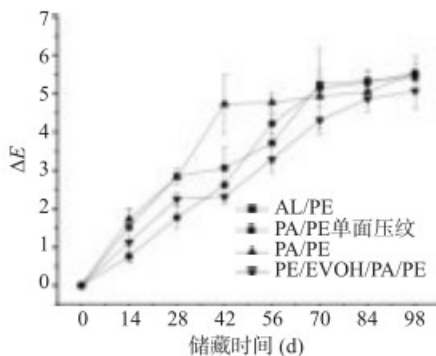


图 7 不同包装材料中紫米加速储藏 98 d  $\Delta E$  的变化  
Fig.7 Change of  $\Delta E$  of purple rice in different packaging materials during 98 days accelerated storage

## 2.7 色价变化

色价是测定紫米中花色苷色素的含量,该色素是一种水溶和醇溶性色素<sup>[21]</sup>。通过测定色价可以反映紫米所含色素总量的 90% 以上<sup>[38]</sup>。图 8 是不同包装材料中紫米加速储藏 98 d 色价的变化。储藏初期色价值为 1.304,储藏过程中,四款包装中紫米的色价变化趋势有所差异,在 0~28 d 范围内不同程度降低,28~98 d 波动上升,紫米麸皮层富含花青素,其颜色和稳定性易受内部及外部因素的影响,如光照、温度、氧气、pH、酶等的影响<sup>[33]</sup>。色价降低可能是由于紫米的花色苷受高温影响,加之四款包装材料氧气

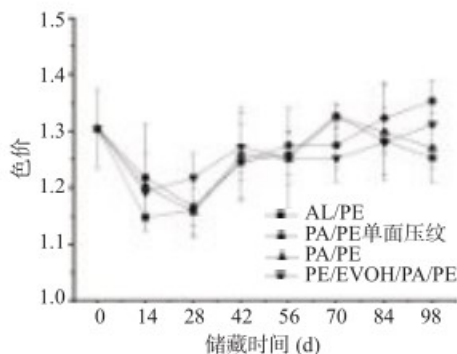


图 8 不同包装材料中紫米加速储藏 98 d 色价的变化  
Fig.8 Changes of color value of purple rice in different packaging materials during 98 days accelerated storage

透过率有所差异,导致包材内部氧气含量不同,所以变化程度不同,紫米的生理生化反应导致脂肪酸含量增加,当 pH 从碱性至强酸性变化时,花色苷色调从红色变至紫色或者蓝色<sup>[39]</sup>,导致色价的检出值增大。Yamuangmorn 等<sup>[40]</sup>研究了紫糙米和紫稻在储藏 6 个月花青素浓度的变化,两者均在 0~1 月降低,1~6 月增加,储藏末期浓度少于初始样品,真空包装比非真空包装的紫米花青素浓度高 10%。从图中可见,AL/PE 材料中紫米的色价变化波动最大,储藏末期色价值为 1.253;最稳定的是 PE/EVOH/PA/PE 材料中的紫米,储藏末期色价值为 1.312;PA/PE 单面压纹材料和 PA/PE 材料储藏末期色价值分别为 1.353 和 1.270。可见 PE/EVOH/PA/PE 材料对于维持紫米中花色苷的稳定性效果最好。

## 2.8 脂肪酸值变化

储藏过程中,脂类物质受温度、氧气、内源酶等的影响会氧化产生游离脂肪酸<sup>[41]</sup>,这是脂肪劣变的第一阶段,表现为脂肪酸值含量不断上升,脂肪酸值含量越高,气味和感官品质越差<sup>[42]</sup>,因此能用于衡量紫米的品质。从图 9 可以发现,不同包装材料中紫米的脂肪酸值的变化趋势相似,都是随着储藏时间的增加而增大,该趋势与周绪霞等<sup>[43]</sup>、臧茜等<sup>[10]</sup>研究结果一致,米粒表面微生物的增加也会加速脂类的分解。在储藏期 98 d,PA/PE 单面压纹材料和 PA/PE 材料中紫米的脂肪酸值上升较快,分别为 133.0 mg/100 g、132.3 mg/100 g,其次是 AL/PE 材料,含量为 123.6 mg/100 g,最低的是 PE/EVOH/PA/PE 材料,为 115.6 mg/100 g。由于紫米的麸皮层含有较多的脂质,在 35 °C 储藏下,脂肪水解酶活性较高,酶促反应导致脂肪水解速度加快,除此之外,脂类与包装内的氧气发生非酶促反应(氧化作用)也会使脂肪酸增加<sup>[44]</sup>,不同包装材料的氧气透过率不同,该因素使脂肪酸值增加速度有所不同,四款包装中按氧气透过率排序为 PA/PE 单面压纹材料>PA/PE 材料>AL/PE 材料>PE/EVOH/PA/PE 材料,综合可见,包装材料的氧气透过率越低越有利于减缓脂质氧化<sup>[45]</sup>。

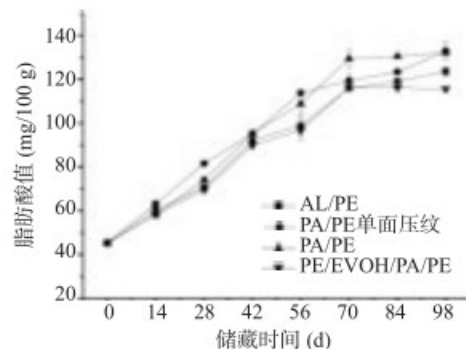


图 9 不同包装材料中紫米加速储藏 98 d 脂肪酸值的变化  
Fig.9 Changes of fatty acid values of purple rice in different packaging materials during 98 days accelerated storage

## 2.9 形态结构的变化

稻谷脱壳后未打磨,因此糙米会保留完整的麸



呈现正相关,水分含量与电导率、脂肪酸呈现正相关,霉菌含量与电导率呈现正相关,蛋白质与电导率、脂肪酸呈现负相关。选取与脂肪酸( $Y_C$ )相关性较高的储藏时间( $X_1$ )和  $\Delta E(X_2)$  进行线性回归分析,得二元线性回归方程  $Y_C=0.679X_1+5.677X_2+42.496$  ( $R^2=0.959$ ;  $F=82.540$ ,  $P<0.01$ )。

### 3.4 PE/EVOH/PA/PE 材料中紫米各指标的相关性

由表 6 可知,紫米在该包装中储藏时间与蛋白质呈现负相关、与脂肪酸呈现正相关,水分与霉菌含量、电导率、脂肪酸之间呈正相关,蛋白质与色价呈负相关,电导率与脂肪酸呈正相关。选取与脂肪酸( $Y_D$ )相关性较高的储藏时间( $X_1$ )和水分含量( $X_2$ )进行线性回归分析,得二元线性回归方程  $Y_D=0.231X_1+10.702X_2+46.126$  ( $R^2=0.929$ ;  $F=46.815$ ,  $P<0.01$ )。

表 6 储藏期间 PE/EVOH/PA/PE 材料中紫米各指标的相关性

Table 6 Correlation of purple rice indexes in PE/EVOH/PA/PE materials during storage

	水分	霉菌含量	蛋白质	电导率	$\Delta E$	色价	脂肪酸
储藏时间	0.658	0.171	-0.713*	0.623	0.986**	0.410	0.968**
水分		0.782*	-0.358	0.859**	0.671	0.260	0.733*
霉菌含量			0.235	0.564	0.181	-0.108	0.278
蛋白质				-0.429	-0.669	-0.794*	-0.653
电导率					0.696	0.069	0.726*
$\Delta E$						0.288	0.973**
色价							0.328

## 4 结论

本研究通过使用四种不同阻隔性的包装材料 AL/PE、PA/PE 单面压纹、PA/PE、PE/EVOH/PA/PE 材料对紫米进行包装后储藏 98 d 后发现,各材料中紫米的水分含量有不同程度的上升而后下降、电导率先增加后降低、 $\Delta E$ 、脂肪酸值不断增大,蛋白质含量小幅上升后不断下降,霉菌含量先增加后减少至稳定,电子鼻能明显区分不同储藏期及不同包装材料中紫米。从水分含量、 $\Delta E$ 、色价、脂肪酸值、形态结构指标来看,高阻隔材料 PE/EVOH/PA/PE 包装的紫米品质较稳定,从霉菌含量、电导率指标来看,PA/PE 单面压纹材料包装的紫米品质较稳定。采用高阻隔性包装材料真空包装紫米能延缓紫米的陈化,目前储运更多是采用尼龙复合材料进行包装销售,由于 EVOH 复合材料的成本相对较高,企业相应的包装成本会增加许多,如前文所探究的,虽然 EVOH 材料能保持紫米的部分指标的稳定,但是紫米品质受到很多因素的综合影响,实际储藏过程中,温湿度是一个动态变化的过程,未来的研究方向可以探究不同包装材料、包装方式和储藏条件对紫米品质变化的影响。

### 参考文献

[1] YAMUANGMORN S, PROM-U-THAI C. The potential of high-anthocyanin purple rice as a functional ingredient in human health[J]. *Antioxidants*, 2021, 10(6): 833.

[2] 伍怡斐,钟锦耀,郑经绍,等.贮藏环境与辅助添加物对紫米花色苷稳定性的影响[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(16): 47-53. [WU Y F, ZHONG J Y, ZHENG J S, et al. Effects of storage environment and auxiliary additives on the stability of purple rice anthocyanin[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2020, 41(16): 47-53.]

[3] ZHENG R, REN T, NIU C, et al. Anthocyanins composition and antioxidant activity of purple rice and color degradation under sunlight exposure of purple rice wine[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2022, 16(3): 1889-1900.

[4] CHEN P N, KUO W H, CHIANG C L, et al. Black rice anthocyanins inhibit cancer cells invasion via repressions of MMPs and u-PA expression[J]. *Chemico-Biological Interactions*, 2006, 163(3): 218-229.

[5] DING C, KHIR R, PAN Z, et al. Improvement in shelf life of rough and brown rice using infrared radiation heating[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2015, 8(5): 1149-1159.

[6] 张红建,谢更祥,邹易,等.不同包装材料对大米品质的影响[J]. *粮油食品科技*, 2018, 26(4): 27-30. [ZHANG H J, XIE G X, ZOU Y, et al. Effects of different packaging materials on the quality of rice[J]. *Cereal, Oil and Food Science and Technology*, 2018, 26(4): 27-30.]

[7] 路嵩玉.大米陈化机理的研究及其控制对策[J]. *郑州粮食学院学报*, 1993(4): 1-7. [LU X Y. Research on the mechanism of rice aging and its control measures[J]. *Journal of Zhengzhou Grain College*, 1993(4): 1-7.]

[8] 安红周,黄世豪,罗琼,等.不同加工精度对大米主要储藏特性影响的研究[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(10): 1-8. [AN H Z, HUANG S H, LUO Q, et al. Study on the effect of different processing accuracy on the main storage characteristics of rice[J]. *Chinese Journal of Cereals and Oils*, 2020, 35(10): 1-8.]

[9] NORKAEW O, BOONTAKHAM P, DUMRI K, et al. Effect of post-harvest treatment on bioactive phytochemicals of Thai black rice[J]. *Food Chemistry*, 2017, 217: 98-105.

[10] 臧茜,梅丽娟,王悦,等.低温贮藏条件下 EVOH 材料包装对大米品质的影响[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(20): 222-225. [ZANG X, MEI L J, WANG Y, et al. Effect of EVOH material packaging on rice quality under low temperature storage conditions[J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2017, 45(20): 222-225.]

[11] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 1038-2000 塑料薄膜和薄片气体透过性试验方法 压差法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000. [China National Standardization Administration. GB/T 1038-2000 Plastics-film and sheeting-determination of gas transmission differential-pressure method[S]. Beijing: Standards Press of China, 2000.]

[12] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 16928-1997 包装材料试验方法 透湿率[S] 北京: 中国标准出版社, 1997. [China National Standardization Administration. GB/T 16928-1997 Test method for vapor transmission rate of packaging materials[S]. Beijing: Standards Press of China, 1997.]

[13] 宋善武.高温高湿条件下一种大米包装材料的研究[J]. *食品科技*, 2019, 44(10): 192-195. [SONG S W. Study of a rice packaging material under high temperature and high humidity condi-



- tions[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 44(10): 192-195.]
- [14] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.3-2016 食品中水分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.3-2016 Determination of moisture in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
- [15] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 4789.15-2016 食品微生物学检验 菌落总数测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 4789.15-2016 Food microbiology test-Determination of total bacterial colony[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
- [16] 彭旭怡, 郑经绍, 刘宇航, 等. 基于电子鼻、顶空气相色谱-离子迁移谱分析比较不同杀菌处理紫米甜酒酿中的挥发性成分[J]. 现代食品科技, 2021, 37(7): 259-268. [PENG X Y, ZHENG J S, LIU Y H, et al. Comparison of volatile components in purple rice sweet wine brew with different sterilization treatments based on electronic nose and headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry analysis[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2021, 37(7): 259-268.]
- [17] 蒋大程, 高珊, 高海伦, 等. 考马斯亮蓝法测定蛋白质含量中的细节问题[J]. 实验科学与技术, 2018, 16(4): 143-147. [JIANG D C, GAO S, GAO H L, et al. Details in the determination of protein content by Kaumas Brilliant Blue method[J]. *Experimental Science and Technology*, 2018, 16(4): 143-147.]
- [18] 周显青, 张玉荣. 储藏稻谷品质指标的变化及其差异性[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 238-242. [ZHOU X Q, ZHANG Y R. Changes in quality indicators of stored rice and their variability[J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2008, 24(12): 238-242.]
- [19] 张玉荣, 董永强, 梁彦伟. 不同储藏温度下蒸谷米和大米物理特性对比研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2021, 42(5): 101-109. [ZHANG Y R, DONG Y Q, LIANG Y W. Comparative study on physical properties of steamed rice and rice at different storage temperatures[J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 42(5): 101-109.]
- [20] 黄皓, 王毅, 李莉, 等. 低氧包装对糙米陈化和品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(1): 8-13. [HUANG H, WANG Y, LI L, et al. Effect of low oxygen packaging on aging and quality of brown rice[J]. *Chinese Journal of Cereals and Oils*, 2021, 36(1): 8-13.]
- [21] 中华人民共和国农业部. NYT 832-2004 黑米[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004. [Ministry of Agriculture of the PRC. NYT832-2004 Black rice[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.]
- [22] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 20569-2006 稻谷储存品质判定规则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006. [China National Standardization Administration. GB/T 20569-2006 Guidelines for evaluation of paddy storage character[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.]
- [23] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 29405-2012 粮油检验 谷物及制品脂肪值测定 仪器法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012. [China National Standardization Administration. GB/T 29405-2012 Inspection of grain and oils-Determination of fat acidity of cereal and cereal products-Instrumental analysis method[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.]
- [24] 侯耀玲. 不同包装材料和包装方式对大米储藏保鲜效果的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012. [HOU Y L. Research on the effect of different packaging materials and packaging methods on the storage and preservation of rice[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.]
- [25] 刘欣, 姚远航, 陈文若, 等. 动态温湿度条件下糙米主要储藏品质指标变化[J]. 食品科学, 2019, 40(3): 245-250. [LIU X, YAO Y H, CHEN W R, et al. Changes in the main storage quality indicators of brown rice under dynamic temperature and humidity conditions[J]. *Food Science*, 2019, 40(3): 245-250.]
- [26] 刘璐. 糙米绿色储藏实验研究[D]. 南京: 南京财经大学, 2011. [LIU L. Experimental study on green storage of brown rice[D]. Nanjing: Nanjing University of Finance and Economics, 2011.]
- [27] 陈丽萍, 徐茂琴, 何红萍, 等. 应用 PEN3 型电子鼻传感器快速检测食源性致病菌[J]. 食品科学, 2014, 35(8): 187-192. [CHEN L P, XU M Q, HE H P, et al. Rapid detection of food-borne pathogenic bacteria by applying PEN3-type electronic nose sensor[J]. *Food Science*, 2014, 35(8): 187-192.]
- [28] SAIKRISHNA A, DUTTA S, SUBRAMANIAN V, et al. Ageing of rice: A review[J]. *Journal of Cereal Science*, 2018, 81: 161-170.
- [29] 杨宁, 熊思慧, 何静仁, 等. 紫米营养成分成分及其游离态与结合态组成的 HPLC/LC-MS 分析[J]. 食品与机械, 2017, 33(4): 27-32. [YANG N, XIONG S W, HE J R, et al. HPLC/LC-MS analysis of the nutritional functional components of purple rice and their free and bound state compositions[J]. *Food and Machinery*, 2017, 33(4): 27-32.]
- [30] 战旭梅. 稻米储藏过程中质构品质变化及其机理研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2008. [ZHAN X M. Research on texture quality changes and its mechanism during rice storage[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2008.]
- [31] 赵学伟, 卞科, 王金水, 等. 蛋白质与淀粉的相互作用对陈化大米质构特性的影响[J]. 郑州粮食学院学报, 1998(3): 25-31. [ZHAO X W, BIAN K, WANG J S, et al. Influence of protein-starch interactions on the textural properties of aged rice[J]. *Journal of Zhengzhou Grain Institute*, 1998(3): 25-31.]
- [32] SHI J, ZHANG T, WANG T, LIANG F. Effects of interaction between rice glutelin and starch on starch gelatinization in a simulated storage system[J]. *Journal of Stored Products Research*, 2020, 88: 101660.
- [33] 姚亚静, 芦焱坤, 李建颖, 等. 糙米储藏中品质特性变化及调控研究进展[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(15): 204-209. [YAO Y J, LU X K, LI J Y, et al. Research progress on quality characteristics changes and regulation of brown rice in storage[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(15): 204-209.]
- [34] 姚亚静. 低温、气调、UV-C 处理对糙米贮藏品质的影响[D]. 天津: 天津商业大学, 2021. [YAO Y J. Effects of low temperature, air conditioning and UV-C treatments on the storage quality of brown rice[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2021.]
- [35] 陈涛, 孙术国, 唐倩, 等. 四种黑米储藏期理化指标及食用品质的测定和研究[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(6): 114-121, 142. [CHEN T, SUN J G, TANG Q, et al. Determination and study of

- physical and chemical indicators and edible quality of four types of black rice during storage[J]. *Chinese Journal of Cereals and Oils*, 2021, 36(6): 114-121, 142. ]
- [ 36 ] 马记红. 气调解除后大米品质变化规律的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2013. [ MA J H. Research on the change pattern of rice quality after gas lifting[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2013. ]
- [ 37 ] 陈冰洁, 乔勇进, 张怡, 等. 包装材料厚度对大米贮藏品质的影响[J]. *上海农业学报*, 2022, 38(2): 114-120. [ CHEN B J, QIAO Y J, Z Y, et al. Effect of packaging material thickness on the storage quality of rice[J]. *Shanghai Journal of Agriculture*, 2022, 38(2): 114-120. ]
- [ 38 ] 吴三桥, 史隋孝, 丁锐, 等. 黑米中花青苷色素的测定方法研究[J]. *氨基酸和生物资源*, 2002(3): 66-68. [ WU S Q, SHI S X, DING R, et al. Study on the determination of anthocyanin pigments in black rice[J]. *Amino Acids and Biological Resources*, 2002(3): 66-68. ]
- [ 39 ] 李韬, 张宏宇, 吕玉璋. 花色苷类色素的研究进展[J]. *农业科技与装备*, 2010(5): 23-26. [ LI T, ZHANG H Y, LÜ Y Z. Research progress of anthocyanin-like pigments[J]. *Agricultural Science and Technology and Equipment*, 2010(5): 23-26. ]
- [ 40 ] YAMUANGMORN S, JUMRUS S, JAMJOD S, et al. Stabilizing grain yield and nutrition quality in purple rice varieties by management of planting elevation and storage conditions[J]. *Agronomy*, 2021, 11(1): 83.
- [ 41 ] QI Q, CHU M, YU X, et al. Anthocyanins and proanthocyanidins: Chemical structures, food sources, bioactivities, and product development[J]. *Food Reviews International*, 2022: 1-29.
- [ 42 ] 张岭, 李永富, 史锋, 等. 高温流化糙米储藏稳定性的研究[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(4): 7-12. [ ZHANG L, LI Y F, SHI F, et al. Study on the storage stability of high temperature fluidized brown rice[J]. *Chinese Journal of Cereals and Oils*, 2019, 34(4): 7-12. ]
- [ 43 ] 周绪霞, 梁媛, 张燕彦, 等. 真空包装糙米储藏过程中品质变化分析[J]. *浙江工业大学学报*, 2019, 47(1): 114-118. [ ZHOU X X, LIANG Y, ZHANG M Y, et al. Analysis of quality changes during storage of vacuum-packed brown rice[J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2019, 47(1): 114-118. ]
- [ 44 ] JUNKANA, WONGS-AREE C, RATTANAMECHAISKUL C. Optimal drying and storage conditions for purple rice based on expected high quality[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2018, 42(2): e13502.
- [ 45 ] 谢丹, 葛志刚. 温度及包装材料对留胚米储藏品质的影响研究[J]. *粮食科技与经济*, 2018, 43(7): 72-73. [ XIE D, GE Z G. Study on the effect of temperature and packaging materials on the storage quality of retained embryo rice[J]. *Grain Science and Technology and Economics*, 2018, 43(7): 72-73. ]
- [ 46 ] SHIN M, BAEK M, NO J, et al. Effect of different degrees of milling on the protein composition in brown rice brans[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2022, 16(1): 214-221.
- [ 47 ] ILAG L L, JULIANO B O. Colonisation and aflatoxin formation by *Aspergillus* spp. on brown rices differing in endosperm properties[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1982, 33(1): 97-102.