

微波速熟化黑米贮藏品质变化及货架期预测

徐志村¹, 王俊仁¹, 蒋洁², 张聪男¹, 冯晓宇¹, 陈正行², 王莉^{2*}

(1. 江苏省农垦农业发展股份有限公司现代农业研究院, 江苏南京 210031)

(2. 江南大学粮食发酵工艺与技术国家工程实验室, 江苏无锡 214122)

摘要: 以微波速熟化黑米为研究对象, 以感官评分、水分含量、花色苷含量、脂肪酸值 (fatty acid value, FV)、丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 含量和菌落总数 (colony forming units, CFU) 为评价指标, 研究了其在 20、30、40 °C 贮藏条件下的品质变化规律。结果表明, 不同温度条件下, 随着贮藏时间延长, 速熟化黑米整体感官评分和黑米花色苷的含量都呈现出降低的趋势, 与此同时, FV、MDA 均呈上升趋势, 温度越高变化速率越快, 40 °C 贮藏 35 d, 整体感官评分降至 55.6, 花色苷的含量降低了 14.62%, FV 和 MDA 分别增加了 2.81 倍和 2.74 倍, 水分含量和 CFU 变化不明显。整体感官评分与水分含量和 CFU 无显著相关性, 与花色苷含量、FV 和 MDA 的相关性显著 ($p < 0.05$), 其中, 与 FV 呈极显著负相关性 ($p < 0.01$)。选择 FV 作为关键指标结合 Arrhenius 方程和零级反应动力学模型建立了速熟化黑米货架期的预测模型, 该研究所得出的货架期预测模型的预测值与实测值的相对误差在 8% 以内, 模型的可信度较高, 为速熟化黑米及同类产品货架期的预测提供了技术处支持。

关键词: 黑米; 微波速熟化; 脂肪酸值; 货架期; Arrhenius 方程

文章编号: 1673-9078(2022)05-126-135

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.5.0842

Storage Quality Change and Shelf-life Prediction of Fast Microwave-cured Black Rice

XU Zhicun¹, WANG Junren¹, JIANG Jie², ZHANG Congnan¹, FENG Xiaoyu¹, CHEN Zhengxing², WANG Li^{2*}

(1. Institute of Modern Agriculture, Jiangsu Provincial Agricultural Reclamation and Development Co. Ltd., Nanjing 210031, China)

(2. National Engineering Laboratory for Cereal Fermentation Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Taking the fast microwave-cured black rice as the research object, and sensory score, moisture content, anthocyanin content, fatty acid value (FV), malondialdehyde (MDA) content and total colony forming units (CFU) as the evaluation indexes, the changing trends of storage quality of the microwaved black rice at 20, 30 and 40 °C were studied. The results showed that at different temperatures, the overall sensory score and anthocyanin content of fast cured black rice decreased with the increase of time, whilst FV and MDA increased. The higher the temperature was, the higher the change rate was. After 35 days of storage at 40 °C, the overall sensory score decreased to 55.6, the anthocyanin content decreased by 14.62%, and FV and MDA increased by 2.81 times and 2.74 times, respectively, with the moisture content and CFU changing insignificantly. The overall sensory score had no significant correlation with the moisture content and CFU, but was significantly correlated with the anthocyanin content, FV and MDA ($p < 0.05$), with the overall sensory score having extremely significant and negative correlation with FV ($p < 0.01$). FV was chosen as the key indicator, and the shelf-life prediction model of fast microwave-cured black rice was established through combining the Arrhenius equation and zero-order reaction kinetics model. The relative error between the predicted value and the measured value of the shelf-life prediction model was within 8%, indicating the high reliability of the model. This study provides technical

引文格式:

徐志村, 王俊仁, 蒋洁, 等. 微波速熟化黑米贮藏品质变化及货架期预测[J]. 现代食品科技, 2022, 38(5): 126-135, +234

XU Zhicun, WANG Junren, JIANG Jie, et al. Storage quality change and shelf-life prediction of fast microwave-cured black rice [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(5): 126-135, +234

收稿日期: 2021-08-03

基金项目: 江苏水稻绿色生产及精深加工技术集成创新与示范应用 (BE2019395)

作者简介: 徐志村 (1986-), 男, 工程师, 硕士, 研究方向: 农产品精深加工与产品开发, E-mail: xuzhicun123@163.com

通讯作者: 王莉 (1981-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 粮食精深加工, E-mail: legend0318@hotmail.com

support for predicting the shelf-life of fast cured black rice and similar products.

Key words: black rice; microwave quick curing; fatty acid value; shelf life; Arrhenius equation

我国是一个农业大国, 谷物资源丰富, 其中黑米种植品种占据全世界的 90% 以上, 主要分布在我国的桂、滇、黔、湘、鄂、徽等省份^[1]。黑米具有很高的营养价值, 据相关研究, 黑米中蛋白质、膳食纤维、矿物元素以及维生素等功能性成分含量都高于普通糙米, 据分析, 黑米中氨基酸含量的平均值为 11.28%, 远高于普通糙米的 6%~8%^[2]。黑米的皮层是黑米营养价值最为丰富的部位^[3], 富含酚酸、黄酮类、花青素、谷维素、及多种维生素, 具有抗氧化、抗炎、降三高等多种活性功效^[4,5]。然而, 与其他杂粮类似, 黑米适口性比较差、质地比较硬、不易糊化, 无法与大米同步同熟, 需要提前采取措施花时间进行处理, 跟不上现代快速生活节奏, 阻碍了黑米的消费推广。大量学者对杂粮的速熟化方法进行了研究, 以期通过对杂粮进行预熟化处理达到与大米同步煮熟的效果, Pal^[6]和 Cheng 等^[7]将糙米进行萌芽处理来改善其蒸煮特性, 研究发现萌芽不仅可以使糙米内部分大分子化合物水解, 转化为氨基酸和糖类小分子化合物, 与此同时, 糙米内部的内源酶会被激活, 纤维质糠层外壳被酶解软化, 从而使糙米更加易煮, 改善了蒸煮品质。Lee 等^[8]和 Xia 等^[9]利用微生物发酵的方法来改善糙米蒸煮特性, 发现糙米经过一定条件微生物发酵可以缩短蒸煮时间, 同时风味物质成分升高, 抗营养因子降低。Liu 等^[10]和 Hu 等^[11]研究了蒸煮预糊化对青稞和红米的蒸煮品质的影响, 发现预糊化可改善青稞和红米的蒸煮和食用品质, 但部分功能性成分含量会降低。Li 等^[12]采用高温流化的方法处理糙米, 使糙米蒸煮时间缩短了 6 min。Shen 等^[13]利用微波技术处理糙米, 结果发现, 微波处理后的糙米米饭硬度和回生值显著降低, 蒸煮品质显著改善。杂粮在储藏过程中容易氧化哈败而变质, 尤其是经预处理后, 杂粮微结构被破坏, 更容易发生氧化哈败, 以往学者大多专注于如何改善杂粮的蒸煮品质, 往往忽略了产品的稳定化和保质期问题, 本研究以微波技术速熟化处理的黑米为研究对象, 采用 ASLT 方法, 应用阿伦尼乌斯 (Arrhenius) 相关模型及统计分析原理, 以感官评分、脂肪酸值 (fatty acid value, FV)、丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 含量、菌落总数 (colony forming units, CFU)、花色苷含量和水分含量为评价指标, 预测速熟化黑米的货架期, 为完善速熟化黑米的品质预测提供了技术支持。

1 材料与方法

1.1 实验材料与仪器

1.1.1 实验材料

洋县黑米 (糙米): 秦稻 1 号, 汉中市秦优谷农业发展有限公司; 盐城大米: 武育粳 3 号, 江苏省农垦米业集团有限公司; 苯酚、无水乙醇、氢氧化钾、酚酞、三氯乙酸、乙二胺四乙酸二钠、硫代巴比妥酸 (TBA)、硫代硫酸钠、碘、碘化钾, 以上试剂均为分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; 糖化酶, 江苏博立生物制品有限公司。

1.1.2 主要仪器

CF-100KS 万能粉碎机, 广州市晨雕机械设备有限公司; HS-6 恒温数显水浴锅, 常州市金坛良友仪器有限公司; FA-2204B 电子分析天平, 山东晨拓科学仪器有限公司; AXTD-5A 台式离心机, 盐城市安信实验仪器有限公司; COWB2L 型工业微波炉, 江阴辰欧微波能系统设备有限公司; IR 隧道炉, 深圳市章氏精密电热科技有限公司; BSC250 恒温恒湿箱, 上海博迅实业有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 速熟化黑米的制备

(1) 原料预处理: 选用优质洋县黑米秦稻 1 号, 过 15 目筛, 除去杂质, 备用。

(2) 浸泡: 将预处理后的黑米室温没水浸泡 50 min, 沥干备用。

(3) 微波处理: 将沥干的黑米均匀摊平, 设置微波功率 2 kW、温度 100 °C 条件下, 微波处理 6 min。

(4) 红外灭酶: 将黑米转移至 IR 隧道炉中进行红外灭酶, 130 °C 条件下处理 20 s。

(5) 冷却: 红外灭酶后的黑米室温冷却, 即得速熟化黑米。

1.2.2 贮藏实验

将速熟化处理黑米按照 200 g/袋规格进行真空包装, 分别在 20、30、40 °C, 相对湿度 60% 条件下进行储藏, 定期取样分别进行感官评分, 并测定脂肪酸值、丙二醛含量、花色苷含量、水分含量和菌落总数。

1.2.3 理化指标的测定

食味相关指标测定: 采用米饭食味计 (STA/A),

自动测定米饭的硬度、黏度、弹性值；脂肪酸值的测定：采用 GB/T 15684-2015 的方法测定；丙二醛含量的测定：采用 GB 5009.181-2016 的方法测定；黑米花色苷的测定：采用 NY/T 3164-2017 的方法测定。

1.2.4 糊化度的测定

采用孙军涛等^[14]的方法：黑米粉碎，过 100 目筛，称取制备好的黑米粉样品 1.00 g 于 P₁ 瓶中，再取黑米粉样品 1.00 g 于 P₂ 瓶中，分别加入蒸馏水 50 mL，再取一 C 瓶，同样加入蒸馏水 50 mL，作为空白对照。将 P₁ 瓶放在电炉上，保持微沸状态，糊化反应 20 min，放至室温，后各加入糖化酶液 2 mL，摇匀，50 °C 摇动保温 1 h。取出冷却至室温，各加入 1 mol/L HCl 溶

液 2 mL 停止糖化反应，精确定容至 100 mL 过滤，备用。分别量取糖化滤液 10 mL 于 3 三个 100 mL 碘量瓶中，分别加入 0.1 mol/L 氢氧化钠溶液 18 mL 及 0.1 mol/L 碘液 5 mL，放置反应 15 min，后各加入 2 mL 10% 硫酸溶液，最后用 0.1 mol/L 的硫代硫酸钠溶液滴定到无色，精确记录消耗掉的滴定液的体积 (mL)。

$$\text{糊化度}/\% = \frac{V_0 - V_2}{V_0 - V_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

V₀—滴定空白所消耗的滴定液体积，mL；

V₁—滴定微波速熟化黑米所消耗的滴定液体积，mL；

V₂—滴定未处理黑米所消耗的滴定液体积，mL。

表 1 黑米饭感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation criteria for black rice

一级指标	二级指标	具体特性描述
气味评分 20 分	浓郁性、纯正性 20 分	香味浓郁，具有黑米饭特有的香味：17~20
		饭味清香，具有黑米饭特有的香味：14~16
		黑米饭香味不明显：11~13 黑米饭无香味，但也无异味：6~10 黑米饭有异味：0~6
外观结构评分 20 分	黑米饭颜色 7 分	具有黑米饭特有的颜色，且颜色均匀：6~7 黑米饭颜色正常：3~5 黑米饭有杂色或不均匀：0~2
	黑米饭光泽 8 分	黑米饭有明显光泽：7~8 黑米饭稍有光泽：4~6 黑米饭无光泽：0~3
	饭粒完整性 5 分	黑米饭结构紧密且饭粒完整：4~5 黑米饭大部分结构紧密完整：2~3 黑米饭粒出现明显爆花：0~1
适口性评分 30 分	黑米饭粘性 10 分	黑米饭清爽，有粘性，不粘牙：9~10 黑米饭有粘性，基本不粘牙：6~8 黑米饭有粘性，粘牙；或无粘性：0~5
	黑米饭弹性 10 分	黑米饭有嚼劲，弹性好：8~10 黑米饭稍有嚼劲，有弹性：5~7 黑米饭疏松、发硬，没有弹性或弹性不明显：0~5
	黑米饭软硬度 10 分	黑米饭口感软硬适中：9~10 黑米饭口感略硬或略软：5~8 黑米饭口感很硬或很软：0~4
滋味评分 25 分	持久性、纯正性 25 分	黑米饭咀嚼时，有浓郁的黑米香味和较明显甜味：22~25 黑米饭咀嚼时，有淡淡的黑米香味和甜味：12~21 黑米饭咀嚼时，无黑米滋味和甜味，但也无异味：1~11 黑米饭咀嚼时，有异味：0
冷饭质地评分 5 分	粘弹性、软硬度、成团性 5 分	黑米饭软硬适中、粘弹性好、较松散：4~5 黑米饭稍变硬、粘弹性稍差、结团：2~3 黑米饭明显偏硬、粘弹性差、板结：0~1

表 2 原料理化指标

Table 2 Physical and chemical indicators of raw materials (%)

项目	水分	蛋白质	脂肪	直链淀粉(干基)	支链淀粉(干基)	灰分
黑米(秦稻1号)	12.87±0.21 ^a	10.12±0.15 ^a	3.51±0.14 ^a	17.93±0.31 ^a	37.88±0.29 ^a	1.97±0.11 ^a
大米(武育粳3号)	14.02±0.19 ^b	6.71±0.20 ^c	0.21±0.03 ^d	16.22±0.27 ^b	63.02±0.33 ^d	1.12±0.09 ^b

注:表中数据为平均值±标准偏差,同列不同小写字母表示不同实验组之间在0.05水平存在显著性差异。表4同。

1.2.5 蒸煮时间的测定

采用刘明等^[15]的方法,使用玻璃板-白芯法进行米饭蒸煮时间的测定。称取10g速熟化黑米样品,加入到100mL沸水中进行蒸煮。蒸煮的过程中,每隔2min时间随机取出8粒黑米样品放置于玻璃板上,然后进行挤压,观察黑米米芯变化,当黑米均无白芯出现时即为蒸煮时间。

1.2.6 感官评分

随机选择20位经过专业培训的感官评价人员组成评分小组,参照安红周等^[16]介绍的方法,略有改动,对黑米饭进行感官评分,感官评分中各指标及评分标准如表1所示,对黑米饭的适口性、外观结构、气味、滋味和冷饭质地5个方面分别打分,按5个方面的权重计算黑米饭整体感官评分,具体计算方法为感官整体评分=适口性评分+外观结构评分+气味评分+滋味评分+冷饭质地评分。

1.2.7 速熟化黑米货架期预测方法

根据黑米饭各指标相关性分析结果,确定与整体感官评分相关性最大的关键指标,选择该关键指标分别做零级和一级动力学模型[式(2)、式(3)]拟合。将拟合度高的模型与Arrhenius方程[式(4)]联合,建立速熟化黑米货架期的预测模型。

$$A=A_0+k_0 \times t \quad (2)$$

$$A=A_0 e^{kt} \quad (3)$$

式中:

t —贮藏时间 d;

A —贮藏时间 t 时的指标;

A_0 —初始指标;

k —反应速率常数。

$$\ln k = \frac{-E_a}{RT} + \ln k_0 \quad (4)$$

式中:

k —反应的速率常数;

E_a —反应的活化能, kJ/mol;

T —贮藏的绝对温度, K;

k_0 —指前因子;

R —气体摩尔常数, 8.314J/(mol·K)。

分别将零级和一级反应动力学模型和 Arrhenius 方程联合,建立速熟化黑米货架期的预测模型,如式

(5)、式(6)所示:

$$SL = \frac{|A_0 - A|}{k_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right)} \quad (5)$$

$$SL = \frac{\ln \frac{A}{A_0}}{k_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right)} \quad (6)$$

1.3 数据分析

所有实验平行重复3次,最终试验结果取3次实验结果的平均值。试验数据的处理采用 Excel 2016 和 SPSS 20.0 进行分析。

2 结果与讨论

2.1 微波处理对黑米食味品质的影响

表 3 微波处理对黑米食味品质的影响

Table 3 Effect of microwave treatment on eating quality of black rice

指标	黑米		大米(对照)
	处理前	处理后	
最佳蒸煮时间/min	42.80±0.18 ^a	30.50±0.31 ^c	30.30±0.24 ^c
硬度值/kgf	7.50±0.09 ^a	4.61±0.11 ^b	4.20±0.09 ^c
黏度值/kgf	0.39±0.02 ^a	0.59±0.09 ^b	0.68±0.10 ^c
弹性值/kgf	0.57±0.15 ^a	0.68±0.12 ^c	0.72±0.07 ^c

注:表中数据为平均值±标准偏差,同行不同小写字母表示不同实验组之间在0.05水平存在显著性差异。

微波速熟化处理黑米的目的是改善其蒸煮品质,达到与大米同步煮熟的效果,黑米速熟化的最佳状态是其最佳蒸煮时间与大米接近,此时蒸熟杂粮米饭不会有夹生现象。表2为未处理黑米原料的理化指标,表3为黑米微波处理前后食味指标和最佳蒸煮时间的数据对比。通过数据分析可知,经微波处理,黑米的蒸煮品质和食味品质有了明显的改善,最佳蒸煮时间缩短了28.73%,硬度值降低了38.53%,黏度值和弹性值分别升高了51.28%和19.30%,与大米最佳蒸煮时间相对比,平均差值<0.5min,主要原因是微波处理使黑米内部淀粉发生预糊化,产生预糊化化效果,另一方

面原因可能是微波处理使黑米皮层微结构被破坏,使水分在蒸煮过程中能够更容易的快速进入黑米籽粒内部,加速了黑米内部淀粉糊化,从而缩短了蒸煮时间。张媛等^[17]也发现用微波处理绿豆、黑豆、黑米和薏米等杂粮,发现可以显著缩短杂粮的蒸熟时间,杂粮品种不同经过微波处理可以将蒸煮时间缩短5.0~26.0 min不等,Zhong等^[18]研究了微波处理对不同碾磨度糙米的组成和蒸煮品质的影响,也得出了相一致的结论。

表4 速熟化黑米水分含量和糊化度

Table 4 Moisture content and gelatinization degree of quick curing black rice (%)

指标	水分	糊化度
速熟化黑米	9.88±0.14 ^b	39.72±0.31 ^d
未处理黑米	12.87±0.21 ^a	2.42±0.27 ^a
大米	14.02±0.19 ^b	3.66±0.40 ^c

黑米经速熟化处理后水分含量和糊化度如表4所示,黑米经微波速熟化处理后糊化度达到39.72%,高于刘佳男等^[19]报道的33.19%,主要由于黑米品种和处理工艺不同所致。速熟化处理后黑米的糊化度并非越高越好,糊化度越高,蒸熟时间越短,米饭越容易软烂,影响产品的口感和感官。王姝雯等^[20]在对不同干燥方法对预糊化黑米蒸煮品质的影响的研究中也得出了一致的结论。

2.2 不同贮藏温度对速熟化黑米品质的影响

2.2.1 不同贮藏温度对速熟化黑米感官评分变化的影响

表5 贮藏温度对速熟化黑米感官整体评分的影响

Table 5 Effect of storage temperature on the whole sensory score of quick curing black rice

贮藏条件/℃	贮藏时间/d					
	0	7	14	21	28	35
20	100	100	97.72	95.33	90.54	88.46
30	100	93.11	88.43	82.47	74.95	71.16
40	100	82.18	73.55	65.73	60.27	55.64

产品感官是产品品质最直观的表现,直接影响市场和消费者对产品的接受度,同时也是产品货架期的重要判断依据^[21,22]。表5为20、30、40℃贮藏条件下速熟化黑米的感官整体评分结果,图1为适口性、外观结构、气味、滋味、冷饭质地5个方面的感官评分结果。在0~28 d阶段,通过5方面的数据分析可知,速熟化黑米持续保持着浓郁的黑米香味、滋味以及良好的外观结构。在贮藏28 d后,与20、30℃贮藏条件相比,40℃贮藏黑米品质明显降低,贮藏35 d时,出现了明显的哈败味,整体感官评分下降至55.64分,说

明40℃贮藏黑米到达了产品的货架期终点。感官品质是消费者购买产品的重要考虑因素,所以感官评分可作为一项重要指标,通过分析与其他指标间的相关性,选择出适宜构建货架期预测模型的关键指标^[23]。

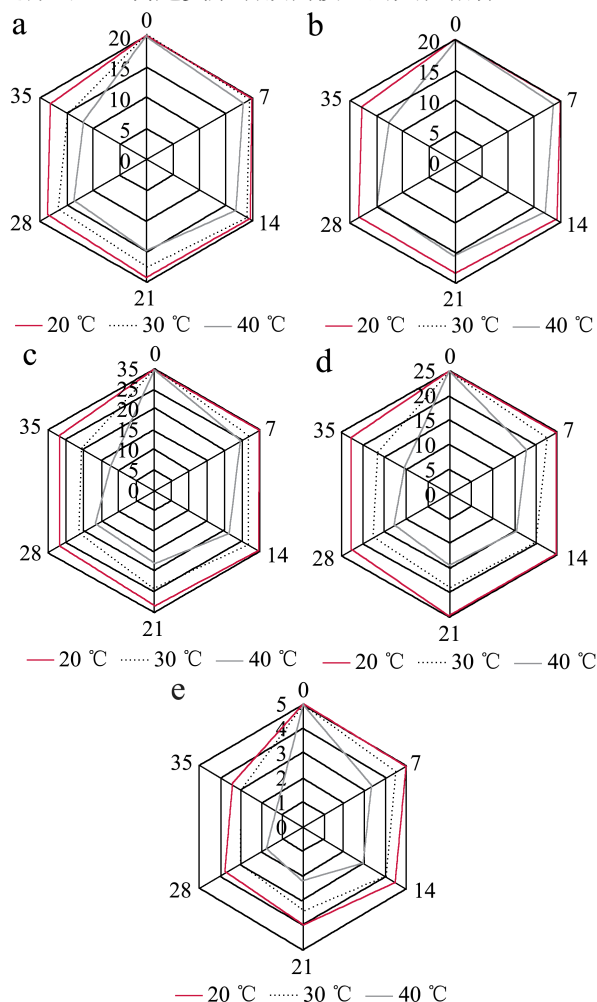


图1 贮藏温度对速熟化黑米感官评分的影响

Fig.1 Effect of storage temperature on the sensory score of quick curing black rice

注: a: 气味; b: 外观结构; c: 适口性; d: 滋味; e: 冷饭质地。

2.2.2 不同贮藏温度对速熟化黑米水分含量变化的影响

粮食贮藏环境对粮食品质具有重要影响,谷物贮藏过程中易吸潮而导致发霉变质^[24]。由图2可知,在20、30、40℃贮藏条件下贮藏35 d后,速熟化黑米的水分含量始终保持在9.88%~10.40%区间波动,且经方差分析可知,在相同贮藏时间下,20、30和40℃贮藏组之间无显著性差异($p>0.05$),同时,与初始水分之间也无显著性差异($p>0.05$),表明在贮藏实验过程中,外部化境的水分无法进入产品内部,产品不会因吸潮发霉而导致品质变差。

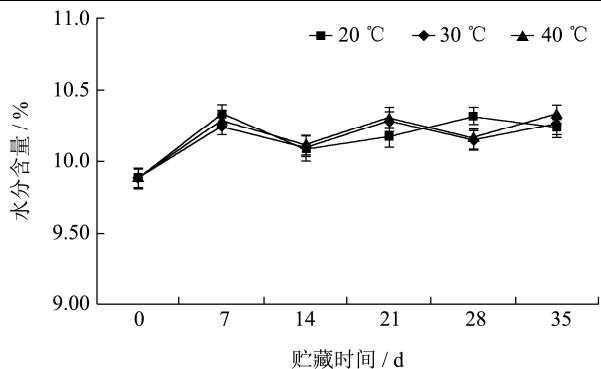


图2 贮藏温度对速熟化黑米水分含量的影响

Fig.2 Effect of storage temperature on the moisture content of quick curing black rice

2.2.3 不同贮藏温度对速熟化黑米花色苷含量变化的影响

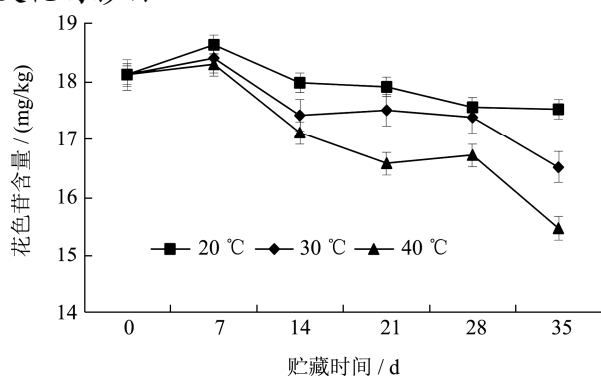


图3 贮藏温度对速熟化黑米花色苷含量的影响

Fig.3 Effect of storage temperature on the anthocyanin content of quick curing black rice

由图3可知,在贮藏过程中随着贮藏期的延长,速熟化黑米花色苷的含量呈现出先升高后降低趋势,黑米花色苷的含量整体是下降的。0~7 d贮藏期,20、30、40 °C贮藏条件速熟化黑米的总花色苷含量分别由18.12 mg/kg上升为18.65、18.42和18.30 mg/kg,后7~35 d贮藏期呈持续下降趋势,分别下降至17.53、16.52和15.47 mg/kg,相比初始值分别下降了3.37%、8.83%和14.62%,贮藏温度越高,总花色苷含量下降速率越快,陈涛等^[25]在对黑米储藏期理化指标及食用品质的测定和研究中也发现,黑米总花色苷含量随贮藏时间的延长先升高后降低,在储藏30 d时达到最高峰,本研究中花色苷含量在贮藏7 d时达到最高峰,最高峰出现时间不同主要原因是包装形式和实验条件不同。刘长姣等^[26]、蒋新龙^[27]研究了黑米花色苷在贮藏过程中的稳定性和降解动力学,研究发现黑米花色苷降解反应符合一级反应动力学,温度越高,降解速率越快,得出了与本研究一致的结论。伍怡斐等^[28]、张书瑜^[29]等研究了贮藏条件对黑米和紫米花色苷稳定性的影响,结果表明温度和光照强度与花色苷保留率呈显著负相

关,因此,黑米贮藏应避免高温和强光照射。贮藏前期黑米花色苷含量增加可能是由于黑米中的原花色苷分解为花色苷所致,而后期含量下降可能是由于花色苷清除贮藏过程中产生的自由基及过氧化物所致。

2.2.4 不同贮藏温度对速熟化黑米 FV 值变化的影响

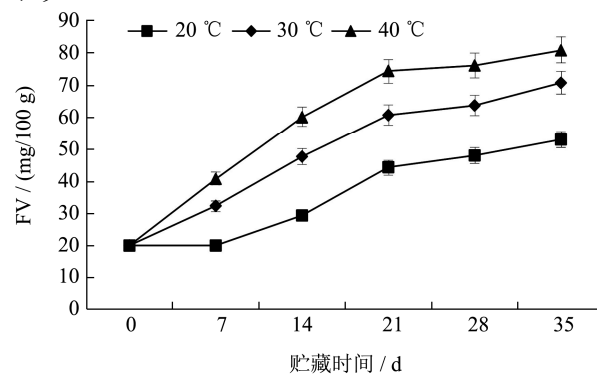


图4 贮藏温度对速熟化黑米 FV 值的影响

Fig.4 Effect of storage temperature on FV of quick curing black rice

速熟化黑米贮藏过程中,FV值的变化如图4所示,在20、30、40 °C贮藏条件下在贮藏35 d后,速熟化黑米的FV值分别由初始值21.19 mg/100 g上升至53.06、70.74和80.77 mg/100 g,分别增加了1.50、2.34和2.81倍,不同贮藏条件下的FV值均有上升,在21~35 d阶段,FV值持续上升,但速度略微变缓。贮藏过程中脂肪酸值的增加可能是由于在贮藏过程中黑米细胞中三酰甘油酯和磷脂中的结合脂肪酸在脂肪酶和氧化酶的作用下不断水解,并伴随着细胞中酸度的改变等原因所致。陈涛等^[25]对四种黑米贮藏指标和食用品质进行了研究,研究也发现脂肪酸值随着贮藏时间的延长不同程度呈上升趋势,27 °C贮藏270 d,脂肪酸值增加了24.93 mg/100 g,与本研究黑米脂肪酸值变化趋势相一致,李东坤^[30]对稻谷贮藏期间品质变化的研究,也得到了与本研究相一致的结论,周显青等^[31]对于稻谷储藏的研究中,也发现稻谷脂肪酸值随储藏时间呈现持续上升趋势,糙米在35 °C条件下贮藏26周,脂肪酸值有9.00 mg/100 g以下水平上升至80.00 mg/100 g以上水平,也与本研究脂肪酸值变化趋势相一致。游离脂肪酸是黑米脂肪氧化分解的产物,FV值在一定程度上反应了黑米氧化变质的程度^[25]。

2.2.5 不同贮藏温度对速熟化黑米 MDA 变化的影响

丙二醛是黑米的脂类物质在贮藏过程中氧化的最终产物^[32],可以通过测定丙二醛含量(MDA)的变化来判定黑米脂质的氧化程度^[33]。黑米贮藏过程中MDA变化如图5所示,在20、30、40 °C贮藏条件下

在贮藏 35 d 后,速熟化黑米的 MDA 值分别由初始值 20.96 $\mu\text{g}/100\text{g}$ 上升至 43.58、62.99 和 78.31 $\mu\text{g}/100\text{g}$, 分别增加了 1.08、1.96 和 2.74 倍,不同贮藏条件下的 MDA 值均有上升。周显青等^[33]研究了加速陈化对粳稻的储藏品质、加工品质和营养品质的影响,研究结果发现,稻谷的 MDA 随储藏时间延长,呈现出先升高后下降的趋势,在储藏 16 周时达到峰值,然后逐渐下降,本研究中黑米贮藏时间为 7 周,贮藏期内 MDA 呈持续上升趋势,与周显青等的研究结论时一致的。丙二醛是游离脂肪酸进一步氧化分解的产物,MDA 值可以作为表征谷物氧化变质的重要指标,速熟化黑米 MDA 值持续上升主要原因是游离脂肪酸持续氧化分解为丙二醛^[33]。

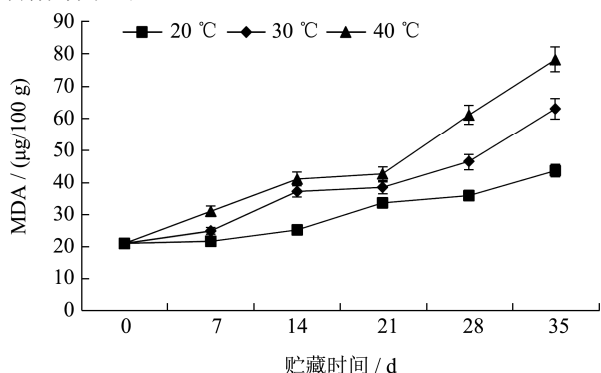


图 5 贮藏温度对速熟化黑米 MDA 值的影响

Fig.5 Effect of storage temperature on MDA of quick curing black rice

2.2.6 不同贮藏温度对速熟化黑米菌落总数的影响

图 6 表示了速熟化黑米在不同温度贮藏条件下菌落总数的变化情况,从图 6 中可以看出,在贮藏过程中,随着时间的延长,菌落总数虽有增加,但变化并不明显。在 0~7 d 贮藏期,不同温度样品菌落总数均呈现出相对较快速度增长,由 1600 cfu 最高增长至

1700 cfu, 7~35 d 贮藏期,菌落总数增长趋势变缓,变化不再明显,最高增长至 1800 cfu,原因是: 0~7 d 贮藏期,包装内部存在部分残留氧气,微生物增长繁殖,导致菌落总数升高,而 7~35 d 贮藏期,包装内部残留氧气耗尽,同时黑米水分含量较低,外部环境不利于微生物繁殖,导致菌落总数增长缓慢。宋永令等^[34]研究了储藏温度对稻谷品质和微生物含量的影响,研究发现稻谷菌落总数随储藏时间呈上升趋势,30 °C 条件下储藏 28 d,稻谷菌落总数有 4000 cfu 增加的 8000 cfu,增加了 1 倍,菌落总数增长速度远高于本研究,主要原因一方面是本研究中黑米经过微波和 IR 处理,起到了杀菌的作用,另一方面是本研究中黑米采用真空包装形式导致环境缺氧,同时水分含量低不利于微生物繁殖。

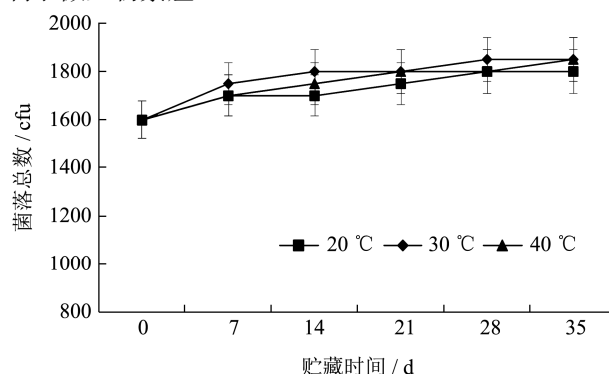


图 6 贮藏温度对速熟化黑米菌落总数的影响

Fig.6 Effect of storage temperature on CFU of quick curing black rice

2.3 速熟化黑米在不同贮藏温度条件下货架

期预测模型的建立

2.3.1 速熟化黑米在不同贮藏温度条件下指标相关性分析

表 6 速熟化黑米在 20 °C 贮藏条件下各品质指标之间的相关系数

Table 6 Pearson correlation coefficient among indexes of quick curing black rice stored at 20 °C

指标	水分含量	花色苷含量	MDA	FV	菌落总数	感官评分
水分含量	1	-0.45	0.50	-0.48	0.23	-0.51
花色苷含量		1	-0.90**	-0.82*	-0.45	0.85**
MDA			1	0.96**	0.51	-0.96**
FV				1	0.57	-0.97**
菌落总数					1	-0.54
感官评分						1

注: *相关性显著 ($p < 0.05$); **相关性极显著 ($p < 0.01$), 下同。

表 6~8 为速熟化黑米在 20、30、40 °C 贮藏条件下各品质指标之间的相关性分析。在不同温度贮藏条件下,速熟化黑米的感官整体评分与水分含量和菌落

总数无显著相关性,与花色苷含量、MDA 和 FV 相关系数均 > 0.80 , 相关性较好,其中与 FV 值相关系数最高,均 > 0.90 ($p < 0.01$),且呈极显著负相关关系,在

20、30、40 °C贮藏条件下相关系数分别为-0.97、-0.96、-0.95，因此可以选择 FV 值作为速熟化黑米货架期预测模型的关键性指标。在 40 °C贮藏条件下，当贮藏期达到 35 d 时，产品的感官评分下降到最低值（55.64 分），产品的货架期也达到了终点，此时 FV 值为 80.77 mg/100 g。

2.3.2 速熟化黑米在不同贮藏温度条件下反应

表 7 速熟化黑米在 30 °C贮藏条件下各品质指标之间的相关系数

Table 7 Pearson correlation coefficient among indexes of quick curing black rice stored at 30 °C

指标	水分含量	花色苷含量	MDA	FV	菌落总数	感官评分
水分含量	1	-0.44	0.49	-0.43	0.31	-0.48
花色苷含量		1	-0.91**	-0.84*	-0.58	0.85**
MDA			1	0.96**	0.66	-0.94**
FV				1	0.71	-0.96**
菌落总数					1	-0.61
感官评分						1

表 8 速熟化黑米在 40 °C贮藏条件下各品质指标之间的相关系数

Table 8 Pearson correlation coefficient among indexes of quick curing black rice stored at 40 °C

指标	水分含量	花色苷含量	MDA	FV	菌落总数	感官评分
水分含量	1	-0.41	0.48	-0.41	0.39	-0.45
花色苷含量		1	-0.91**	-0.86*	-0.61	0.87**
MDA			1	0.94**	0.70	-0.95**
FV				1	0.71	-0.95**
菌落总数					1	-0.68
感官评分						1

表 9 速熟化黑米在不同贮藏温度条件下 FV 值变化的动力学模型参数

Table 9 Kinetic model parameters of FV of quick curing black rice storage at different temperature

温度/K	零级				一级			
	回归方程	k	R ²	ΣR ²	回归方程	k	R ²	ΣR ²
293.15	y=1.07t+17.12	1.07	0.94		y=19.01e ^{0.03t}	0.03	0.92	
303.15	y=1.47t+23.52	1.47	0.96	2.8	y=24.54e ^{0.04t}	0.034	0.86	2.54
313.15	y=1.72t+28.53	1.72	0.90		y=27.95e ^{0.04t}	0.034	0.76	

2.3.3 速熟化黑米在不同贮藏温度条件下货架期预测模型的建立

根据不同贮藏温度条件下 FV 值的变化趋势，建立速熟化黑米货架期动力学预测模型。以 lnk 为 y 值、1/T 为 x 值，作 Arrhenius 曲线，得到速熟化黑米以 FV 值为指标的 Arrhenius 方程，如下公式 7：

$$y = -2803.81x + 9.63, R^2 = 0.96 \quad (7)$$

由公式 (7) 的线性方程计算得到，FV 变化相对应的反应活化能 E_a 为 23310.90 J/mol，指前因子 k₀ 为 15269.47。不同贮藏温度条件下速熟化黑米 FV 值变化的 Arrhenius 方程曲线 R² 值大于 0.90，结合零级动力学模型和 Arrhenius 方程，得到速熟化黑米 FV 值的货架期动力学预测模型，如下公式 (8)：

级数的确定

食品在贮藏过程中会发生很多化学反应，大多数食品贮藏过程中发生的品质劣变反应遵循零级 (式 2) 和一级 (式 3) 反应模式^[35]，表 9 为速熟化黑米在 20、30、40 °C贮藏条件下其 FV 值的零级和一级反应动力学模型及反应速率常数、决定系数 R² 和 ΣR²，综合分析可知，FV 值指标的变化符合零级动力学模型。

$$SL = \frac{|A_0 - A|}{15269.47 \exp\left(\frac{-23310.90}{RT}\right)} \quad (8)$$

由公式 (8) 可知，在已知速熟化黑米贮藏温度 T、FV 的原始值 A₀ 和 FV 最终值 A (最终可接受值或国家标准等标准中规定限值) 的情况下，就可以计算出该产品在任意温度下的货架期。

2.3.4 速熟化黑米在不同贮藏温度条件下货架期预测及验证

表 10 为在 20、30、40 °C 不同贮藏条件下速熟化黑米货架期的预测值与实测值之间的比较，两者的相对误差在 8% 以内，这表明该模型可以用来预测速熟化黑米的货架期。

表10 速熟化黑米在不同贮藏温度条件下FV指标的货架期预测值和实测值

Table 10 Shelf-life predicted and measured value of FV of quick curing black rice storage at different temperature

指标	温度/℃	货架期 预测值/d	货架期 实测值/d	相对 误差/%
FV	20	97	101	-3.96
	30	58	60	-3.33
	40	35	38	-7.89

3 结论

以微波速熟化黑米为研究对象,研究了其在不同温度贮藏条件下感官评分、水分含量、花色苷含量、FV、MDA 和 CFU 的变化规律,并在此基础上选取合适的指标建立了货架期预测模型。研究表明,不同温度贮藏条件下,随着贮藏时间的延长,速熟化黑米的整体感官评分和花色苷含量均呈下降趋势,与此同时,FV、MDA 均呈上升趋势,温度越高变化速率越快,40℃贮藏 35 d,整体感官评分降至 55.6,花色苷含量下降了 14.62%,FV 和 MDA 分别增加了 2.81 倍和 2.74 倍,水分含量和 CFU 变化不明显。在不同温度贮藏条件下,随着贮藏时间的延长,速熟化黑米的整体感官评分与水分含量和菌落总数无显著相关性,花色苷含量、FV 和 MDA 与速熟化黑米整体感官评分间的 Pearson 系数均>0.8,具有显著相关性($p<0.05$),其中,FV 与整体感官评分间的 Pearson 系数>0.9,且呈极显著负相关($p<0.01$)。选择 FV 作为关键指标,结合零级反应动力学模型和 Arrhenius 方程建立了速熟化黑米的货架期预测模型,模型货架期预测值与实测值的相对误差在 8%以内,表明该模型的可信度较高。本研究建立的 FV 值货架期预测模型能够为预测和监控微波速熟化黑米在贮藏期间的货架期提供理论参考,同时也为同类产品货架期的预测提供借鉴意义。

参考文献

[1] 张名位,赖来展,杨雄,等.中国黑米种质资源的评价与利用研究进展[J].湖北农学院学报,1995,4:310-318
ZHANG Mingwei, LAI Laizhan, YANG Xiong, et al. Research advances in the evaluation and utilization of black pericarp rice in China [J]. J. Hubei Agric Coll, 1995, 4: 310-318

[2] Ito V C, Lacerda L G. Black rice (*Oryza sativa* L.): a review of its historical aspects, chemical composition, nutritional and functional properties, and applications and processing

technologies [J]. Food Chemistry, 2019, 301(125304): 1-12

[3] Ti H, Guo J, Zhang R, et al. Phenolic profiles and antioxidant activity in four tissue fractions of whole brown rice [J]. RSC Advances, 2015, 5(123): 101507-101518

[4] Halah A, Wang D, Luo Z S. Black rice (*Oryza sativa* L.) processing: evaluation of physicochemical properties, *in vitro* starch digestibility, and phenolic functions linked to type 2 diabetes [J]. Food Research International, 2021, 141: 109898

[5] Qiu T, Sun Y, Wang X, et al. Drum drying-and extrusion-black rice anthocyanins exert anti-inflammatory effects via suppression of the NF- κ B /MAPKs signaling pathways in LPS-induced RAW 264.7 cells [J]. Food Bioscience, 2020, 2: 100841

[6] Pal P, Singh N, Kaur P, et al. Comparison of composition, protein, pasting, and phenolic compounds of brown rice and germinated brown rice from different cultivars [J]. Cereal Chemistry, 2016, 93(6): 1-40

[7] Cheng L, Oh S G, Lee D H, et al. Effect of germination on the structures and physicochemical properties of starches from brown rice, oat, sorghum, and millet [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 105(Pt 1): 931-939

[8] Lee S M, Lim H J, Chang J W, et al. Investigation on the formations of volatile compounds, fatty acids, and γ -lactones in white and brown rice during fermentation [J]. Food Chemistry, 2018, 269: 347-354

[9] Xia Q, Green B D, Zhu Z Z, et al. Innovative processing techniques for altering the physicochemical properties of wholegrain brown rice (*Oryza sativa* L.): opportunities for enhancing food quality and health attributes [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2018, 59(20): 1-54

[10] Liu K, Zhang B, Chen L, et al. Hierarchical structure and physicochemical properties of highland barley starch following heat moisture treatment [J]. Food Chemistry, 2019, 271(JAN.15): 102-108

[11] Hu Z, Tang X, Liu J, et al. Effect of parboiling on phytochemical content, antioxidant activity and physicochemical properties of germinated red rice [J]. Food Chemistry, 2017, 214: 285-292

[12] Li Y, Su X, Shi F, et al. High-temperature air-fluidization-induced changes in the starch texture, rheological properties, and digestibility of germinated brown rice [J]. Starch-Stärke, 2017, 69(9-10): 1-10

[13] Shen L, Zhu Y, Wang L, et al. Improvement of cooking quality of germinated brown rice attributed to the fissures caused by microwave drying [J]. Journal of Food Science and

- Technology Mysore, 2019, 56(1): 2737-2749
- [14] 孙军涛,张智超,肖付刚,等.高温高压蒸煮对六种杂粮糊化度的影响[J].食品工业,2019,40(10):84-87
SUN Juntao, ZHANG Zhichao, XIAO Fugang, et al. Effect of high temperature and high pressure on gelatinization of six kinds of coarse cereals [J]. Food Indus, 2019, 40(10): 84-87
- [15] 刘明,孟宁,朱运恒,等.低温等离子体技术改善糙米蒸煮品质工艺优化及热力学特性研究[J].粮油食品科技,2020,28(2):49-54
LIU Ming, MENG Ning, ZHU Yunheng, et al. Process optimization and thermodynamic property analysis of brown rice cooking quality improvement by low temperature plasma technology [J]. Sci Techno Cereals, Oils and Foods, 2020, 28(2): 49-54
- [16] 安红周,杨柳,林乾,等.不同加工精度籼米的感官品质和营养品质[J].中国粮油学报,2021,36(3):1-7
AN Hongzhou, YANG Liu, LIN Qian, et al. Sensory evaluation and nutritional quality of Indica rice with different milling degrees [J]. J. Chinese Cereal Oil Assoc, 2021, 36(3): 1-7
- [17] 张媛,苏静雯,张克,等.杂粮预糊化处理及营养品质特性[J].食品工业,2020,41(7):336-339
ZHANG Yuan, SU Jingwen, ZHANG Ke, et al. The coarse cereals' pretreatment and nutritional quality characteristics [J]. Food Indus, 2020, 41(7): 336-339
- [18] Zhong Y, Tu Z, Liu C, et al. Effect of microwave irradiation on composition, structure and properties of rice (*Oryza sativa* L.) with different milling degrees [J]. Journal of Cereal Science, 2013, 58(2): 228-233
- [19] 刘佳男.四种杂粮米预熟化工艺及理化性质的研究[D].长春:吉林农业大学,2017
LIU Jia'nan. Research of the precook process and physicochemical properties of four coarse rice [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2017
- [20] 王姝雯,陈贞,陈虹宏,等.不同干燥过程中预糊化黑米的水分变化规律及对其蒸煮品质的影响研究[J].食品科技,2020,45(1):225-231
WANG Shuwen, CHEN Zhen, CHEN Honghong, et al. Study on the change rule of moisture of pre-gelatinized black rice in different drying processes and its effect on cooking quality [J]. Food Sci Tech, 2020, 45(1): 225-231
- [21] 王芳,张佳汇.鸡精调味料货架期预测模型的建立[J].食品工业,2021,42(3):197-202
WANG Fang, ZHANG Jiahui. Quality changes of chicken essence seasoning under different storage temperatures and the establishment of the prediction model of shelf life [J]. Food Indus, 2021, 42(3): 197-202
- [22] 樊沁昕,谢忆雯,高振洪,等.不同贮藏温度对自热食品货架期的影响[J].包装工程,2020,41(15):163-169
FAN Qinxin, XIE Yiwen, GAO Zhenhong. Effect of different storage temperature on shelf life of self-heating food [J]. Packaging Engineering, 2020, 41(15): 163-169
- [23] Houghg, Garitta L. Methodology for sensory shelf-life estimation: a review [J]. Journal of Sensory Studies, 2012, 27(3): 137-147
- [24] 周颖,项海玲,刘悦,等.我国粮食存储现状分析[J].产业与科技论坛,2021,20(7):66-67
ZHOU Ying, XIANG Hailing, LIU Yue, et al. Analysis of current situation of grain storage in our country [J]. Indus Techno For, 2021, 20(7): 66-67
- [25] 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,2021,6:114-121
CHEN Tao, SUN Shuguo, TANG Qian, et al. Determination and research of physicochemical indexes and eatable quality of four kinds of black rice during storage [J]. J. Chinese Cereal Oil. Assoc, 2021, 6: 114-121
- [26] 刘长姣,申丹妮,王磊,等.黑米花色苷热降解动力学研究[J].中国食品添加剂,2018,7:109-113
LIU Changjiao, SHEN Danni, WANG Lei, et al. Thermal degradation kinetics study on black rice anthocyanins [J]. China Food Additives, 2018, 7: 109-113
- [27] 蒋新龙.黑米花色苷降解特性研究[J].中国粮油学报,2013,28(4):27-31
JIANG Xinlong. Black rice anthocyanin degradation characteristics [J]. J. Chinese Cereal Oil Assoc, 2013, 28(4): 27-31
- [28] 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 Yifei, ZHONG Jinyao, ZHENG Jingshao, et al. Effects of storage environment and additives on the stability of purple rice anthocyanins [J]. Sci Techno Food Indus, 2020, 41(16): 47-53
- [29] 张书瑜,杨锐铛,刘榛,等.黑米黑色素的稳定性研究[J].云南大学学报(自然科学版),2019,41(S1):72-75
ZHANG Shuyu, YANG Ruidang, LIU Zhen, et al. Study on the stability of black rice melanin [J]. J Yunnan University (Nat Sci), 2019, 41(S1): 72-75