

抹茶对贮藏期间薏仁米脂质氧化的影响

Effects of matcha on lipid oxidation during storage of coix seed

陈 婵 黄 靖

CHEN Chan HUANG Jing

(福建农业职业技术学院现代农业工程学院, 福建 福州 350007)

(College of Modern Agricultural Engineering, Fujian Vocational College of
Agriculture, Fuzhou, Fujian 350007, China)

摘要:目的:利用天然物质抹茶延长薏仁米货架期。方法:以新鲜薏仁米为原料,经过不同剂量抹茶茶粉处理,测定贮藏期间薏仁米的水分含量、脂肪酸值、过氧化值、丙二醛含量等各项指标及菌落总数和脂质氧化关键酶的变化。结果:经不同剂量抹茶茶粉处理均会抑制薏仁米贮藏期间脂肪酸值、过氧化值、丙二醛含量以及脂肪酶和脂肪氧化酶活性的上升,减少水分的消耗及微生物的生长繁殖。抹茶对薏仁米的保藏效果存在一定程度的剂量依赖性,但添加质量分数为 0.05% 和 0.08% 的抹茶茶粉处理的保藏效果差异较小。贮藏 4 个月后,与自封袋组相比,添加质量分数为 0.05% 的抹茶茶粉处理组中薏仁米的脂肪酸值、过氧化值和丙二醛含量分别降低了 31.60%, 30.77%, 44.83%, 脂肪酶和脂肪氧化酶活性分别降低了 23.05%, 28.74%, 且游离脂肪酸组成和含量与新鲜薏仁米更相似。结论:抹茶能有效抑制薏仁米贮藏期间脂质氧化,延长其货架期。

关键词:抹茶;薏仁米;脂质氧化;贮藏;脂肪酸

Abstract: **Objective:** This study aimed to study the effect of matcha on lipid oxidation during the storage of coix seed. **Methods:** The fresh coix seeds were used as raw material and treated with matcha tea powder in different doses. The changes in water content, fatty acid value, peroxidation value, malondialdehyde content, total number of colonies and key enzyme of lipid oxidation were determined during the storage of coix seeds. **Results:** The treatment with different doses of matcha powder could inhibit the increase of fatty acid value, peroxide value, malondialdehyde content, lipase, and lipoxigenase activities, and reduce water consumption and microbial growth during storage of coix seeds. The preservation effect of matcha on

coix seeds was dose-dependent to a certain extent, but the difference in the preservation effect of adding matcha tea powder with a mass fraction of 0.05% and 0.08% was small. After 4 months of storage, compared with the self-sealing bags group, the fatty acid value, peroxide value and malondialdehyde content of coix seeds in the treatment group with the addition of 0.05% matcha powder were decreased by 31.6%, 30.77% and 44.83%, respectively. The activities of lipase and lipoxigenase decreased by 23.05% and 28.74%, respectively, and the composition and content of free fatty acids were more similar to those of fresh coix seeds. **Conclusion:** Matcha could effectively inhibit lipid oxidation during storage of coix seeds and extended shelf life.

Keywords: matcha; coix seeds; lipid oxidation; storage; fatty acid

薏仁米(coix seed)是一种优质的小杂粮,具有丰富的营养和药用功效,素有“米中之王”的美称^[1]。相比稻米、高粱和小麦,薏仁米的脂肪含量较高,极易在贮藏期间陈化劣变,导致营养流失,不良风味产生^[2]。脂质氧化是导致薏仁米酸败劣变的主要原因,而 R·、内源性脂肪酶和脂肪氧化酶是介导薏仁米脂质氧化的主要因素^[3-4]。迷迭香提取物等多酚类化合物可有效抑制薏仁米贮藏期间脂肪酸值和过氧化值的快速上升,从而延缓脂质氧化^[5]。

抹茶作为一种健康无害的天然食品添加剂,被广泛应用于食品工业^[6]。抹茶是一种粉末茶,是以茶树嫩叶为原料,经过遮阴栽培、蒸青、冷却、脱水、干燥、组合粉碎等多道工序制作而成^[7]。抹茶能较好地保存茶叶的营养物质和活性成分,使其具有较高的营养与保健价值^[8]。抹茶中富含茶氨酸、茶多酚和生物碱等天然活性物质,具有较好的抗氧化和抗菌功效^[9]。此外,抹茶茶粉的表面积较大,更容易附着在谷物表面,有效抑制脂质氧化^[10]。因此,抹茶可作为谷物贮藏抗脂质氧化的潜在生物活性物质。

目前,有关抹茶在薏仁米保鲜中的研究尚未见报道。

基金项目:福建省职业教育研究重点课题(编号:GA2022006)

作者简介:陈婵(1980—),女,福建农业职业技术学院副教授,硕士。E-mail: 107078605@qq.com

收稿日期:2023-05-19 **改回日期:**2023-11-05

研究拟探究抹茶对薏仁米贮藏期间脂质氧化的效果,比较抹茶添加量对薏仁米贮藏期间水分含量、脂肪酸值、过氧化值、丙二醛含量等各项指标及菌落总数和脂质氧化关键酶的演替规律,以期延长薏仁米货架期,为天然生物活性物质在薏仁米贮藏保鲜中的应用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

薏仁米:小白壳,贵州黔西南兴仁某薏仁米种植基地(当年产新鲜薏仁米);

抹茶:茂绿,浙江茶叶集团有限公司;

苯、石油醚、三氯甲烷、乙醇、冰乙酸、硼酸、亚油酸、盐酸、硫代巴比妥酸、可溶性淀粉、酚酞、氢氧化钾、碘化钾、硫代硫酸钠、乙二胺四乙酸二钠:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

甲醇、正庚烷:色谱纯,成都中锦隆科技发展有限公司。

1.2 仪器与设备

高速万能粉碎机:DFT-150 型,上海垒固仪器有限公司;

电子天平:SQ-FA-2104 型,苏州顺强机电设备有限公司;

旋涡混匀仪:Vortex-2A 型,济南博坤科学仪器有限公司;

恒温干燥箱:DS-30H 型,上海灯晟仪器科技有限公司;

旋转蒸发仪:R105050L 型,巩义市京华仪器有限责任公司;

恒温培养箱:PS-3600A 型,成都瑞派斯科技有限公司;

紫外可见分光光度计:SH-6600 型,江苏盛奥华环保科技有限公司;

气相色谱仪:GC-2010 Pro 型,日本岛津制作所。

1.3 方法

1.3.1 薏仁米贮藏 将新鲜薏仁米装入 7 号自封袋(14 cm×20 cm)中,每袋 200 g,共 20 袋,随机分为 4 组:1 组为自封袋组,不添加任何抗氧化剂;其余 3 组分别添加质量分数为 0.01%,0.05%,0.08%的抹茶茶粉,分别为低、中、高剂量抹茶组,混匀后于 30 °C 恒温培养箱中贮藏 4 个月^[5]。

1.3.2 水分及脂质氧化各指标测定

(1) 含水量:参照 GB 5009.3—2016。

(2) 脂肪酸值:参照 GB/T 5510—2011。

(3) 过氧化值:参照 GB 5009.227—2016。

(4) 丙二醛:参照 GB 5009.181—2016。

1.3.3 菌落总数测定 参照 GB 4789.2—2016。

1.3.4 脂质氧化关键酶测定

(1) 脂肪酶:参照 GB/T 5523—2008。

(2) 脂肪氧化酶:根据李永富等^[4]的方法提取粗酶

液,参照魏林等^[5,11]的方法进行测定。

1.3.5 脂肪酸测定 参照 GB 5009.168—2016。

1.3.6 数据处理 所有试验均重复 3 次,结果以平均值±标准偏差表示;使用 GraphPad Prism 8.0 软件绘图;采用 SPSS 21.0 软件进行单因素方差分析(ANOVA),字母不同表示差异具有统计学意义($P<0.05$)。

2 结果与分析

2.1 贮藏期间薏仁米含水量变化

由图 1 可知,新鲜薏仁米的含水量为 12.53%,表明新鲜薏仁米的贮藏时间较短,不加以贮藏则容易发生霉变,引起变质^[3]。随着贮藏时间的延长,各组薏仁米含水量不断下降,其中自封袋组薏仁米含水量的下降速率较快,经不同剂量抹茶茶粉处理的薏仁米,其含水量下降较慢。贮藏至 4 个月时,自封袋组薏仁米含水量最低,仅为 10.31%,低、中、高剂量抹茶组薏仁米含水量分别为 10.47%,10.62%,10.66%,且显著高于自封袋组($P<0.05$)。这与魏林^[5]的结论一致。因此,添加抹茶茶粉能抑制薏仁米贮藏期间含水量的降低,但存在一定的剂量依赖性,添加质量分数为 0.05%,0.08%的抹茶茶粉保藏效果较好。

2.2 贮藏期间薏仁米脂肪酸值变化

由图 2 可知,随着贮藏时间的延长,薏仁米脂肪酸值呈逐渐上升的趋势。贮藏 4 个月后,不同剂量抹茶茶粉处理组薏仁米脂肪酸值显著低于自封袋组($P<0.05$),自封袋组和低、中、高剂量抹茶组薏仁米脂肪酸值分别为 266.48,216.35,182.27,173.09 mg/100 g。这与代来鑫等^[12]的研究结果具有相同趋势。贮藏 4 个月后,中、高剂量组之间无显著差异($P>0.05$),说明经不同剂量抹茶茶粉的处理能有效降低薏仁米脂质水解速率,从而减缓脂肪酸值的升高。

2.3 贮藏期间薏仁米过氧化值变化

由图 3 可知,新鲜薏仁米的过氧化值仅为 33.28 mg/100 g,与魏林^[5]的研究结果相似。随着贮藏时

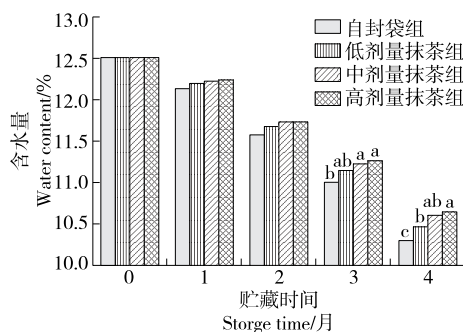


图 1 抹茶剂量对薏仁米含水量的影响

Figure 1 Effects of different doses of matcha on water content of coix seeds

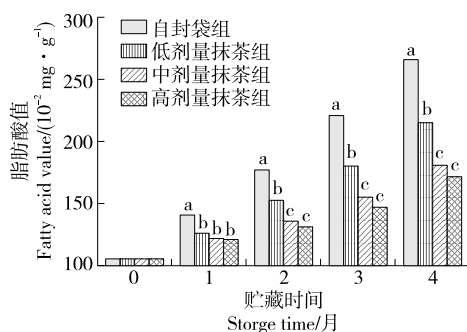


图 2 抹茶剂量对薏仁米脂肪酸值的影响

Figure 2 Effects of different doses of matcha on fatty acid value of coix seeds

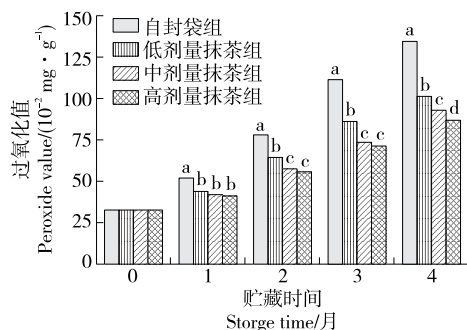


图 3 抹茶剂量对薏仁米过氧化值的影响

Figure 3 Effects of different doses of matcha on peroxide value of coix seeds

间的延长,各组薏仁米过氧化值均呈上升趋势,其中自封袋组薏仁米过氧化值的上升速率最快。贮藏 4 个月后,自封袋组薏仁米过氧化值最高,可达 135.27 mg/100 g,而与自封袋组相比,低、中、高剂量抹茶组中薏仁米过氧化值分别降低了 24.51%,30.77%,35.09%,均显著低于自封袋组 ($P < 0.05$)。抹茶中含有多种天然活性物质,具有较好的抗氧化效果,可以清除超氧自由基,从而抑制脂质氧化^[6]。综上,不同剂量抹茶茶粉处理均可在不同程度上减缓过氧化值的上升,具有剂量依赖性,添加质量分数为 0.05%,0.08% 抹茶茶粉的保藏效果较好。

2.4 贮藏期间薏仁米丙二醛含量变化

由图 4 可知,薏仁米中丙二醛含量随贮藏时间的延长而逐渐增加,自封袋组丙二醛含量上升速率较快,而与自封袋组相比,经不同剂量抹茶茶粉处理的薏仁米,其丙二醛含量上升较慢。贮藏 4 个月后,自封袋组薏仁米中丙二醛含量最高,高达 0.87 $\mu\text{mol/g}$,低、中、高剂量抹茶组薏仁米中丙二醛含量比自封袋组分别降低了 29.88%,44.83%,50.57%,均显著低于自封袋组 ($P < 0.05$),与 Jongberg 等^[13]的研究结果一致。贮藏 4 个月后,中、高剂量组之间无显著差异 ($P > 0.05$),说明抹茶能够抑制薏仁米脂质氧化,减缓丙二醛的产生,避免酸败劣变,增加薏仁米贮藏周期。

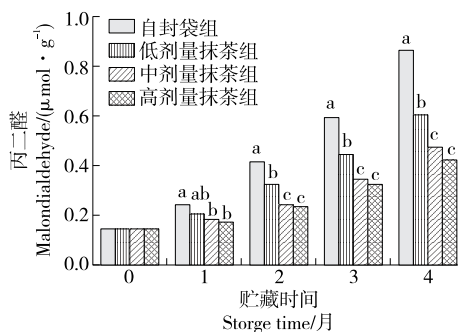


图 4 抹茶剂量对薏仁米丙二醛含量的影响

Figure 4 Effects of different doses of matcha on malondialdehyde content of coix seeds

2.5 贮藏期间薏仁米菌落总数变化

新鲜薏仁米的菌落总数仅为 2.67 lg(CFU/g)。随着贮藏时间的延长,微生物生长繁殖不断加剧,其中自封袋组菌落总数增加较快,而经不同剂量抹茶茶粉处理的薏仁米,其菌落总数增加较慢(见图 5)。贮藏 4 个月后,自封袋组薏仁米中菌落总数最多,为 5.08 lg(CFU/g),显著高于各处理组 ($P < 0.05$),中、高剂量抹茶组薏仁米中菌落总数分别为 3.96,3.87 lg(CFU/g),二者无显著差异 ($P > 0.05$),但显著低于低剂量抹茶组 [4.35 lg(CFU/g), $P < 0.05$]。抹茶中含有具有抑菌的黄酮、多酚和茶碱等物质,能够有效抑制腐败微生物的生长繁殖,从而维持薏仁米品质^[14]。

2.6 贮藏期间薏仁米脂肪酶和脂肪氧化酶活性变化

由图 6 可知,各组薏仁米脂肪酶活性随贮藏时间的延长呈逐渐上升的趋势,其中自封袋组脂肪酶活性增加速率较快,而与自封袋组相比,经不同剂量抹茶茶粉处理的薏仁米,其脂肪酶活性增加较慢。贮藏 4 个月后,自封袋组薏仁米脂肪酶活性最高,达 9.76 mg/g,显著高于各处理组 ($P < 0.05$),中、高剂量抹茶组薏仁米中脂肪酶活性分别为 7.51,7.38 mg/g,二者无显著差异 ($P > 0.05$),但显著低于低剂量抹茶组 (8.02 mg/g, $P < 0.05$),与 Yang 等^[15]的研究结果一致。

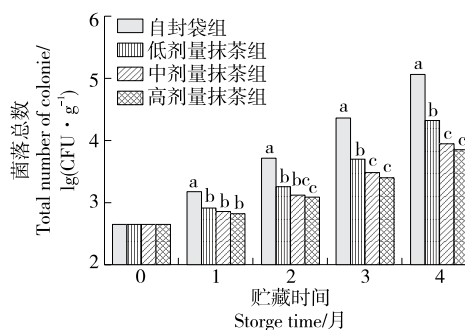


图 5 抹茶剂量对薏仁米菌落总数的影响

Figure 5 Effects of different doses of matcha on the total number of colonies of coix seeds

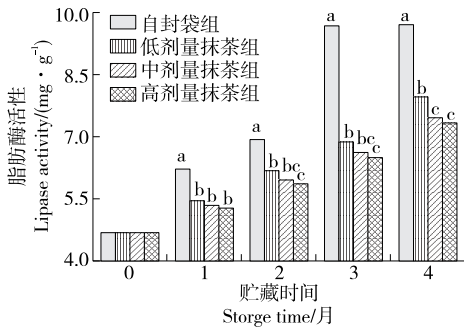


图6 抹茶剂量对薏仁米脂肪酶活性的影响
Figure 6 Effects of different doses of matcha on lipase activity of coix seeds

脂肪氧化酶可将多不饱和脂肪酸加氧催化为氢过氧化物,且醛类物质的产生量与脂肪氧化酶活性呈正相关^[5,16]。脂肪氧化酶活性越高,其脂质氧化程度越剧烈。由图7可知,随着贮藏时间的延长,各组中薏仁米脂肪氧化酶活性均呈上升趋势。贮藏4个月后,自封袋组薏仁米脂肪氧化酶活性为2.54 U/(g · min),是新鲜薏仁米的2.95倍,显著高于各处理组($P<0.05$),低、中、高剂量抹茶组中薏仁米脂肪氧化酶活性分别为2.07, 1.81, 1.75 U/(g · min),其中中、高剂量抹茶组之间无显著差异($P>0.05$)。这与刘小娇等^[17]的研究结果一致。综上,抹茶可通过抑制贮藏期内微生物生长代谢,降低脂肪氧化关键酶的活性,具有减缓薏仁米脂质氧化程度的作用。

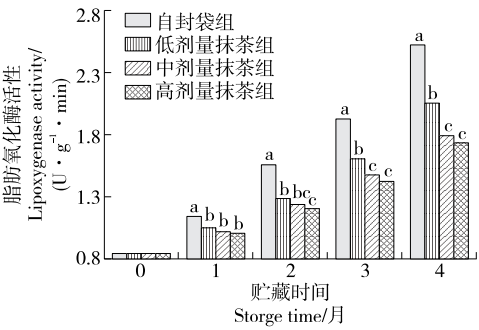


图7 抹茶剂量对薏仁米脂肪氧化酶活性的影响
Figure 7 Effects of different doses of matcha on lipoygenase activity of coix seeds

2.7 贮藏前后薏仁米游离脂肪酸含量变化

由表1可知,薏仁米中检测出棕榈酸、油酸、亚麻酸、亚油酸和硬脂酸5种主要的脂肪酸,其中油酸和亚油酸含量最高,与Igbokwe等^[1]的结论一致。贮藏4个月后,各组的脂肪酸组成不变,但含量差异较大。相比新鲜薏仁米,自封袋组薏仁米的油酸、棕榈酸和硬脂酸含量分别增加了2.12%,3.95%,16.38%,而亚油酸和亚麻酸等多不饱和脂肪酸含量分别减少了4.88%,24.64%。相比自封袋组,经不同剂量抹茶茶粉处理的薏仁米各脂肪酸含量变化较小,尤其是中、高剂量抹茶组,二者的各脂肪酸含量更接近新鲜薏仁米,但中、高剂量组之间无显著差异($P<0.05$)。综上,抹茶的添加有利于缓解薏仁米脂质氧化,维持脂肪酸稳定。

表1 抹茶剂量对薏仁米贮藏前后脂肪酸组成和含量的影响

Table 1 Effects of different doses of matcha on fatty acid composition and content of coix seeds in before and after the storage %

组别	棕榈酸	硬脂酸	油酸	亚油酸	亚麻酸	其他
新鲜薏仁米	13.16±0.08 ^d	1.77±0.03 ^d	49.48±0.14 ^d	34.24±0.12 ^a	0.69±0.02 ^a	0.66±0.02
自封袋组	13.68±0.09 ^a	2.06±0.04 ^a	50.53±0.18 ^a	32.57±0.11 ^d	0.52±0.02 ^d	0.64±0.02
低剂量抹茶组	13.47±0.07 ^b	1.97±0.03 ^b	50.15±0.16 ^b	33.18±0.11 ^c	0.58±0.01 ^c	0.65±0.01
中剂量抹茶组	13.29±0.06 ^c	1.87±0.03 ^c	49.77±0.11 ^c	33.79±0.09 ^b	0.63±0.01 ^b	0.65±0.02
高剂量抹茶组	13.27±0.07 ^c	1.86±0.02 ^c	49.76±0.12 ^c	33.82±0.11 ^b	0.63±0.02 ^b	0.66±0.01

3 结论

试验表明,与自封袋组相比,经不同剂量抹茶茶粉处理均会抑制薏仁米贮藏期间脂肪酸值、过氧化值、丙二醛含量以及脂肪酶和脂肪氧化酶活性的上升,减少水分的消耗及微生物的生长繁殖,游离脂肪酸组成和含量与新鲜薏仁米更相似,一定程度上抑制了薏仁米的脂质氧化,有效延长了薏仁米的货架期。贮藏4个月后,添加质量分数为0.05%,0.08%的抹茶茶粉的保藏效果较好,二者差异较小。经质量分数为0.05%抹茶茶粉处理的,贮藏4个月后,薏仁米中含水量和菌落总数分别为10.62%和3.96 lg(CFU/g),脂肪酸值、过氧化值和丙二醛含量分别

为182.27 mg/100 g、93.64 mg/100 g和0.48 μmol/g,脂肪酶和脂肪氧化酶活性分别为7.51 mg/g和1.81 U/(g · min),有效减缓了贮藏期间薏仁米的脂质氧化。后续将从分子水平揭示抹茶对薏仁米脂质氧化的影响机制。

参考文献

[1] IGBOKWE C J, WEI M, FENG Y, et al. Coix seed: A review of its physicochemical composition, bioactivity, processing, application, functionality, and safety aspects [J]. Food Reviews International, 2021, 35: 1-19.
[2] 杨风仪, 卢红梅, 陈莉, 等. 薏仁米储藏过程中陈化机理的研究

- [J]. 保鲜与加工, 2016, 16(4): 48-55.
- YANG F Y, LU H M, CHEN L, et al. Study on aging mechanism of coix seed during preservation[J]. Storage and Process, 2016, 16(4): 48-55.
- [3] 栾琳琳, 卢红梅, 陈莉, 等. 薏仁米贮藏过程中品质的变化[J]. 食品与机械, 2019, 35(3): 149-154.
- LUAN L L, LU H M, CHEN L, et al. Change in the quality of coix seed during storage[J]. Food & Machinery, 2019, 35(3): 149-154.
- [4] 李永富, 张晶晶, 史锋, 等. 薏仁米贮藏过程中油脂氧化规律及原因探究[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(10): 48-55.
- LI Y F, ZHANG J J, SHI F, et al. Law and reason of oil oxidation of coix seed during storage[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(10): 48-55.
- [5] 魏林. 迷迭香提取物对薏仁米贮藏过程中油脂氧化的影响[J]. 食品科技, 2021, 46(11): 155-160.
- WEI L. Effect of rosemary extract on the oil oxidation of coix seed during storage[J]. Food Science and Technology, 2021, 46(11): 155-160.
- [6] KOLÁČKOVÁ T, KOLOFIKOVÁ K, SYTAROVÁ I, et al. Matcha tea: Analysis of nutritional composition, phenolics and antioxidant activity[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2020, 75(1): 48-53.
- [7] WU J, OUYANG Q, PARK B, et al. Physicochemical indicators coupled with multivariate analysis for comprehensive evaluation of matcha sensory quality[J]. Food Chemistry, 2022, 371: 131100.
- [8] 郭倩文, 杜璇, 倪穗. 6 种抹茶产品的主要成分比较分析[J]. 中国野生植物资源, 2019, 38(3): 31-36.
- GUO Q W, DU X, NI S. Comparative analysis of main components of 6 kinds of matcha products[J]. Chinese Wild Plant Resources, 2019, 38(3): 31-36.
- [9] DEVKOTA H P, GAIRE B P, HORI K, et al. The science of matcha: Bioactive compounds, analytical techniques and biological properties[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 118: 735-743.
- [10] 张依, 范秀章, 赵亚丽, 等. 抹茶的功效性成分、药理作用及其应用的研究进展[J]. 食品安全导刊, 2022(20): 113-115.
- ZHANG Y, FAN X Z, ZHAO Y L, et al. Research progress on chemical composition, pharmacological effects and application of matcha[J]. China Food Safety Magazine, 2022(20): 113-115.
- [11] MEXIS S F, KONTOMINAS M G. Effect of oxygen absorber, nitrogen flushing, packaging material oxygen transmission rate and storage conditions on quality retention of raw whole unpeeled almond kernels (*Prunus dulcis*) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2010, 43(1): 1-11.
- [12] 代来鑫, 卢红梅, 陈莉, 等. 不同储藏条件下薏仁米脂肪酸值及过氧化值的变化[J]. 贵州农业科学, 2014, 42(8): 198-201.
- DAI L X, LU H M, CHEN L, et al. Change of fat acidity value and peroxide value of coix seed in different storage conditions [J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2014, 42(8): 198-201.
- [13] JONGBERG S, TÖRNGREN M A, GUNVIG A, et al. Effect of green tea or rosemary extract on protein oxidation in bologna type sausages prepared from oxidatively stressed pork[J]. Meat Science, 2013, 93(3): 538-546.
- [14] 肖岚星. 抹茶木薯马芬加工工艺及贮藏特性研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2020.
- XIAO L X. Study on processing technology and storage characteristics of matcha cassava muffin [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2020.
- [15] YANG F Y, LU H M, CHEN L, et al. Study on aging mechanism of coix seed during preservation[J]. Storage and Process, 2016, 16(4): 48-55.
- [16] SAITO K, MATSUOKA Y, YAMADA K. Reaction targets of antioxidants in azo-initiator or lipid hydroperoxide induced lipid peroxidation[J]. Free Radical Research, 2020, 54(5): 301-310.
- [17] 刘小娇, 白婷, 王姗姗, 等. 不同处理对青稞脂肪氧化酶活性及品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(7): 39-44.
- LIU X J, BAI T, WANG S S, et al. Effects of different treatments on the activity of lipoxygenase and quality of highland barley[J]. Food Research and Development, 2021, 42(7): 39-44.
- (上接第 139 页)
- [11] 杜雁霞, 程宝义, 贾代勇, 等. 相变材料蓄冷板凝固过程传热研究[J]. 制冷学报, 2005(2): 44-46.
- DU Y X, CHENG B Y, JIA D Y, et al. Study on heat transfer of phase change cool storage slab in solidification [J]. Journal of Refrigeration, 2005(2): 44-46.
- [12] ZARAJABAD O G, AHMADI R. Numerical investigation of different PCM volume on cold thermal energy storage system[J]. Journal of Energy Storage, 2018, 17: 515-524.
- [13] MARQUESA C, DAVIESG F, MAIDMENTG G, et al. Theoretical modelling and experimental investigation of a thermal energy storage refrigerator[J]. Energy, 2013, 55: 457-465.
- [14] AZZOZ K, LEDUCQ D, GOBIN D. Performance enhancement of a household refrigerator by addition of latent heat storage[J]. Int J Refrig, 2007, 31: 892-901.
- [15] LI G, HWANG Y, RADERMACHER R, et al. Review of cold storage materials for subzero applications[J]. Energy, 2013, 51: 1-17.
- [16] ORÓ E, MIRÓ L, BARRENECHE C, et al. Corrosion of metal and polymer containers for use in PCM cold storage [J]. Applied Energy, 2013, 109: 449-453.
- [17] JACKSON G W, JAMES D F. The permeability of fibrous porous media[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 1986, 64(3): 364-374.
- [18] 孙锦涛, 游辉, 谢晶. 蓄冷板对冷库保温的影响实验[J]. 包装工程, 2022, 43(13): 107-116.
- SUN J T, YOU H, XIE J. Experimental research on influence of cold storage plate on insulation of cold storage [J]. Packaging Engineering, 2022, 43(13): 107-116.