陈美花, 邵婷燕, 韦晓兰, 等. 油炸裹糊牡蛎贮藏品质的变化与货架期预测 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(8): 288−294. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020080157
CHEN Meihua, SHAO Tingyan, WEI Xiaolan, et al. Changes in Storage Quality and Shelf Life Prediction of Deep-fried Battered and Breaded Oysters[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(8): 288−294. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020080157

· 贮运保鲜 ·

油炸裹糊牡蛎贮藏品质的变化与货架期预测

陈美花[1,2,3], 邵婷燕[1], 韦晓兰[1], 黄　海[1,2]
(1.北部湾大学食品工程学院, 广西钦州 535011;
2.广西高校北部湾特色海产品资源开发与高值化利用重点实验室, 广西钦州 535011;
3.钦州市食品风味分析与调控重点实验室, 广西钦州 535011)

摘　要: 为探讨油炸裹糊牡蛎的货架寿命，以感官评分、pH、挥发性盐基氮（total volatile basic nitrogen, TVB-N）含量、菌落总数为指标，研究在 4、15、25 ℃ 下贮藏的油炸裹糊牡蛎的品质变化规律，建立并验证油炸裹糊牡蛎在 4~25 ℃ 贮藏温度下的货架期预测模型。结果表明：随贮藏时间的延长，油炸裹糊牡蛎的感官评分不断下降，pH 呈先下降后上升的趋势，TVB-N 含量和菌落总数不断增加，且贮藏温度越高，变化越快。感官评分与 TVB-N 含量的相关性较 pH 与菌落总数的高，以 TVB-N 含量作为关键品质指标，建立的油炸裹糊牡蛎货架期预测模型预测的货架期相对误差小于 6%，可用于快速准确地预测 4~25 ℃ 贮藏温度下油炸裹糊牡蛎的货架寿命。

关键词: 油炸, 裹糊, 牡蛎, 贮藏品质, 货架期预测, 模型
中图分类号: TS254.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2021)08−0288−07
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2020080157

Changes in Storage Quality and Shelf Life Prediction of Deep-fried Battered and Breaded Oysters

CHEN Meihua[1,2,3], SHAO Tingyan[1], WEI Xiaolan[1], HUANG Hai[1,2]
(1.College of Food Engineering, Beibu Gulf University, Qinzhou 535011, China;
2.Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory of Development and High-value Utilization of Beibu Gulf Seafood Resources, Qinzhou 535011, China;
3.Qinzhou Key Laboratory of Food Flavor Analysis and Control, Qinzhou 535011, China)

Abstract: To investigate the shelf life of deep-fried battered and breaded oyster, using sensory score, pH, total volatile basic nitrogen (TVB-N) contents, and the aerobic plate count as indicators, the quality changes of deep-fried battered and breaded oysters stored at 4, 15, and 25 ℃ were studied, and its shelf life prediction model at 4~25 ℃ was established and verified at the same time. The results showed that with the extension of storage time, the sensory scores of deep-fried battered and breaded oysters decreased, pH decreased at first and then increased, TVB-N contents and aerobic plate count increased, and the higher the storage temperatures, the faster the changes. The correlation between sensory scores and TVB-N contents was higher than that of pH and aerobic plate count. With TVB-N contents as the key quality index, the shelf life prediction model of deep-fried battered and breaded oysters was established, and its relative error was less than 6%, which could be used to quickly and accurately predict the shelf life of deep-fried battered and breaded oysters stored at 4~25 ℃.

Key words: deep-fried; battered and breaded; oysters; storage quality; shelf life prediction; model

油炸裹糊牡蛎色泽金黄, 外酥里嫩, 牡蛎特征风味中夹杂着果香, 开胃爽口, 深受各年龄层消费者的欢迎[1]。深度油炸食品中的饱和脂肪和反式脂肪是导致心血管疾病高发病率和某些癌症、肥胖症高风

收稿日期: 2020−08−17
基金项目: 广西高校中青年教师基础能力提升项目（2017KY0808）; 广西高校北部湾特色海产品资源开发与高值化利用重点实验室项目（2016ZB03）; 国家自然科学基金项目（31860442）。
作者简介: 陈美花（1983−）, 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 生鲜食品保鲜与加工, E-mail: cmhyihan@126.com。

险的主要饮食因素[2−3]。具有酥脆的外壳是油炸裹糊产品深受消费者青睐的重要原因。因此，降低油炸裹糊食品的含油量，提高其脆性十分必要。而裹糊配方对降低油炸裹糊食品的含油量和提高其脆性至关重要[2−3]，Zeng 等[4] 研究表明发酵竹笋膳食纤维可显著降低裹糊鱼丸深度油炸过程中的吸油量，Shan 等[5] 研究发现在面糊中同时添加黄原胶和大豆纤维可有效降低裹糊鱼块油炸过程中的吸油量，并改善油炸裹糊鱼块的颜色和脆性，张欢等[6] 研究发现在面糊中同时添加 2% 的羟丙基羧甲基纤维素和 6% 的麦芽糊精，可显著改善预油炸微波复热鸡米花的“浸水”和“浸油”问题，提高其脆性和食用品质。为了进一步降低油炸裹糊牡蛎的含油量、提高其脆性，改善其品质，本研究团队前期在陈美花等[1] 的基础上，对裹糊的配方进行了调整，在调配裹糊的粉中添加了 6.0% 的抗性麦芽糊精和 0.4% 的魔芋膳食纤维，结果发现，这一配方较好地解决了上述问题，显著改善了油炸裹糊牡蛎的品质。

油炸产品的品质在贮藏过程中极易劣变[6−10]，因此，建立油炸产品的货架期预测模型快速预测其货架期对于油炸产品的开发和推广，确保食品的质量安全，满足消费者的需求具有重要意义。基于化学动力学预测食品货架期的出发点是：食品品质指标的变化大多是由化学反应引起的，其变化速率会受到温度等环境因素的影响。该预测方法通常与 Arrhenius 方程结合使用，且只考虑温度的影响，具有简单、适用性较强[11] 的优点，被广泛用于真空油炸面包虾[7−8]、油炸鱼鳔[12]、真空油炸香菇脆片[13]、真空油炸木瓜片[14]、香辣蟹[15]、即食花蛤[16]、牡蛎肉[17]、鱼丸[18]、莴笋菜肴[19] 等产品的货架期预测中。然而，有关油炸裹糊牡蛎货架期预测的相关研究却鲜见报道。

常用的油炸海产食品贮藏品质指标有感官品质、pH、TVB-N 含量、菌落总数、过氧化值、酸价、硫代巴比妥酸（thiobarbituric acid, TBA）值等。Hassan 等[9] 研究发现一种含牡蛎肉的油炸产品在 5 ℃ 下贮藏至货架期终点时，其过氧化值和 TBA 值均未达到限值。潘广坤等[8] 采用一级化学反应动力学方程对真空油炸面包虾各贮藏条件下的 TVB-N 含量、过氧化值和酸价进行回归拟合，发现 TVB-N 含量的拟合度优于过氧化值和酸价，以 TVB-N 含量为指标建立的货架期预测模型预测的准确率在±10% 以内。此外，过氧化值、酸价和 TBA 值测定所需的样品量较多，操作过程较复杂，耗时较长，实际应用存在成本高、效率低的缺陷[7−9]。基于上述原因，本研究以油炸裹糊牡蛎为对象，研究其在 4、15、25 ℃ 贮藏期间感官品质、pH、TVB-N 含量和菌落总数的变化规律，确定简便、高效的关键品质指标，并基于关键指标应用动力学模型建立油炸裹糊牡蛎的货架期预测模型，以期为油炸裹糊牡蛎产品的工业化生产、贮藏和流通提供理论指导和技术参考。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

牡蛎肉（新鲜现场开壳取出，（11±2）g/个）、鸡蛋、百香果、老姜　广西钦州市东风市场；厨房纸巾、食盐、酒精度 52%vol 桂林三花酒、原味小麦粉、鹰粟粉、黄面包糠、起酥油　沃尔玛超市；魔芋膳食纤维（食品级）　湖北一致魔芋生物科技有限公司；抗性麦芽糊精（食品级）　日本松谷化学工业有限公司；铝箔复合袋（材质为 PET/AL/PA/CPP，单层厚度为 0.11 mm）　河北喜来顺包装有限公司；氧化镁、溴甲酚绿、硼酸、甲基红、盐酸、无水碳酸钠、95% 乙醇、氯化钠　均为国产分析纯；平板计数琼脂（PCA）　广东环凯微生物科技有限公司。

ME204E 电子天平　梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司；C21-SK2105 多功能电磁炉　广东美的生活电器制造有限公司；BC210 带油温表油炸锅　日本吉川株式会社；K1 封口机　深圳瑞朗克斯科技有限公司；LHS-150HC-II 恒温恒湿箱、DHG-9075A 鼓风干燥箱　上海一恒科学仪器有限公司；BCD-527WDPC 冰箱　青岛海尔股份有限公司；HC-83110FB 微波炉（微波输出功率 800 W，额定微波频率 2450 MHz）　广东格兰仕微波生活电器制造有限公司；JYL-D022 料理机　九阳股份有限公司；ST5000 pH 计　奥豪斯仪器（常州）有限公司；K1100F 全自动凯氏定氮仪　济南海能仪器股份有限公司；DK-S28 电热恒温水浴锅　上海精宏实验设备有限公司；SQ510C 立式压力蒸汽灭菌锅　日本 YAMATO 公司；SW-CJ-2FD 洁净工作台　苏州安泰空气技术有限公司；IN110 生化培养箱　德国 MEMMERT 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　油炸裹糊牡蛎的制备　参考陈美花等[1] 的方法，略作修改，制备油炸裹糊牡蛎。

1.2.1.1　工艺流程　牡蛎肉→清洗→沥水→腌制→焯水→沥水、吸干表面水分→裹粉→裹糊→裹面包糠→油炸→冷却→包装→贮藏。

1.2.1.2　裹粉前的处理　参考陈美花等[1] 的方法，仅对腌制液的配方及焯水时间进行了调整，将腌制用的百香果原汁改为百香果姜汁（百香果原汁与姜汁的质量比为 2∶1），于 4 ℃ 下静置腌制 30 min 后放入含食盐、姜、桂林三花酒的沸水中焯 1 min。

1.2.1.3　裹粉、裹糊、裹面包糠　裹粉和裹面包糠参照陈美花等[1] 的方法。裹糊的调制：粉（以所有粉的质量计，小麦粉、鹰粟粉、抗性麦芽糊精和魔芋膳食纤维的质量分数分别为 60%、33.6%、6% 和 0.4%）与蛋液（将鸡蛋打入其 5 倍质量的 4 ℃ 蒸馏水中，用粗木筷轻轻地以来回的方式搅拌，尽量避免气泡的形成，搅拌均匀后用 50 目的粉筛过滤，所得滤液即为蛋液）的质量比按 1∶1.2 调制裹糊，具体方法为：取蛋

液置于不锈钢碗中，先加入抗性麦芽糊精用打蛋器以画“8”字的方式搅拌均匀，再加入魔芋膳食纤维以同样的方式搅拌均匀，然后分数次加入小麦粉与鹰粟粉的混合物(事先分别过 50 目的粉筛，再按配方的质量比充分混匀)以同样的方式搅拌均匀，即得裹糊。

1.2.1.4 油炸与冷却 起酥油加热至 175 ℃ 后，每次投入 10 只裹糊牡蛎，炸制 150 s 后捞出，并立即用厨房纸除去油炸牡蛎表面过多的油，转移至干燥器内冷却 30 min。

1.2.1.5 包装与贮藏 参考潘广坤等[8] 的方法，略作修改，将冷却至室温的油炸牡蛎、事先经 121 ℃ 蒸汽灭菌 30 min 的铝箔复合袋及封口机置于洁净工作台中紫外杀菌 30 min。然后，在洁净工作台中对油炸牡蛎进行分装，每袋装 3 只油炸牡蛎，手动挤出袋内的空气后，用封口机封口。最后，将包装好的油炸牡蛎分别放置于 4、15 和 25 ℃ 条件下贮藏，分别于贮藏 1、2 和 3 d 后取样进行感官评定，并测定 pH、TVB-N 值和菌落总数。

1.2.2 油炸裹糊牡蛎贮藏品质指标的测定

1.2.2.1 感官评定 参考陈美花等[1] 和 Hassan 等[9] 的方法制定油炸裹糊牡蛎的感官评定标准(表 1)。取样后，先将油炸裹糊牡蛎放入微波炉中复热 45 s，从微波炉中取出于室温下放置 2 min 后用于感官评定。6 个经过训练的具有专业经验的评定员根据表 1，采用双盲法按照 9 分制，对油炸裹糊牡蛎的表面颜色、质地、风味和总体可接受性打分。各项目的平均分与相应权重乘积的和为油炸裹糊牡蛎的感官综合评分，分数越高，感官品质越好，低于 5 分感官品质不可接受，达到商业货架期终点。

1.2.2.2 pH 的测定 称取 10.000 g 绞碎搅匀的油炸裹糊牡蛎，参照 GB 5009.237-2016《食品安全国家标准 食品 pH 值的测定》[20] 使用 pH 计测定 pH。

1.2.2.3 TVB-N 含量的测定 称取 10.000 g 绞碎搅匀的油炸裹糊牡蛎，参照 GB 5009.228-2016《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》第二法[21] 测定油炸牡蛎的挥发性盐基氮含量。

1.2.2.4 菌落总数的测定 参照 GB 4789.2-2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》[22] 的方法测定油炸裹糊牡蛎的菌落总数。

1.2.3 油炸裹糊牡蛎货架期预测 通过计算油炸裹糊牡蛎各理化及微生物指标与感官评分之间的相关系数，确定油炸裹糊牡蛎货架期预测模型的关键品质指标。建立基于关键品质指标的一级化学反应动力学方程和 Arrhenius 方程，计算得出油炸裹糊牡蛎的货架期预测模型，并对该模型的合理性进行验证[8,23]。

1.2.3.1 一级化学反应动力学模型 食品品质的变化规律通常符合零级或一级反应，可以用零级或一级反应动力学模型来描述[11,24−25]。其中，一级反应动力学模型应用更广泛，其方程式如式(1)所示。

$$y = y_0 e^{kt} \quad \text{式（1）}$$

式中：t，食品的贮藏时间，d；y_0，食品的初始品质指标值，mg/100 g 或 lg(CFU/g)；y，食品贮藏 t d 后的品质指标值，mg/100 g 或 lg(CFU/g)；k，食品品质变化速率常数，d^{-1}。

1.2.3.2 Arrhenius 方程 一般用 Arrhenius 方程来描述温度对食品品质指标变化的影响，Arrhenius 方程的一般形式如式(2)所示[11,26]。

$$k = k_0 exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad \text{式（2）}$$

式中：k_0，指前因子或称为 Arrhenius 常数；E_a，活化能(温度变化不大时，可以视为常数)，J/mol；R，气体常数，8.314 4 J/ (mol·K)；T，绝对温度，K。

对式(2)两边取对数得式(3)。

$$lnk = lnk_0 - \frac{E_a}{RT} \quad \text{式（3）}$$

通过实验分别测得 4、15、25 ℃ 条件下贮藏不同时间的油炸裹糊牡蛎的关键品质指标值，采用一级反应动力学模型方程式(1)分别对不同贮藏温度下的

表 1 油炸裹糊牡蛎的感官评定标准

Table 1 Sensory evaluation standards of deep-fried battered and breaded oysters

项目与权重	品质描述	评分(分)
表面颜色0.20	极差(呈极浅的黄色或白色，出现黑斑，色泽不均匀)	1
	中等(呈浅黄色或黄褐色，不太均匀，偏亮或偏暗)	5
	非常好(呈金黄色，均匀，亮度合适)	9
质地0.30	极差(内外层结合太松或交界处汁液多，外壳不脆甚至发黏、油腻，内部肉质干硬)	1
	中等(内外层结合较松，外壳较酥脆、稍油腻，内部肉质较嫩)	5
	非常好(内外层结合较紧密，外壳酥脆不油腻，内部肉质滑嫩)	9
风味0.35	极差(油炸香味、牡蛎及百香果特征风味很淡，腥味、氨臭味、哈喇味等不良风味明显)	1
	中等(油炸香味、牡蛎及百香果特征风味较淡，鲜味略淡，略有异味)	5
	非常好(油炸香味、牡蛎及百香果特征风味浓厚，鲜美，无不良风味)	9
总体可接受性0.15	极差	1
	中等	5
	非常好	9

实验数据进行拟合分析，得到不同贮藏温度下油炸裹糊牡蛎关键品质指标值的变化速率常数 k。再采用式(3)对不同贮藏温度及其对应的 k 值进行拟合分析，求出 k_0 和$-E_a$。

1.2.3.3　货架期预测方程　结合式(1)和式(2)，可以得出油炸裹糊牡蛎的货架期(SL)预测方程式(4)。

$$SL=\frac{ln(y/y_0)}{k_0exp(-E_a/RT)} \quad 式（4）$$

确定油炸裹糊牡蛎货架期终点对应的关键品质指标值 y，测出其对应的初始品质指标值 y_0，代入求出的 k_0 和$-E_a$值，即可预测出油炸裹糊牡蛎的货架期。

1.3　数据处理

所有试验至少重复 3 次，试验结果以“平均值±标准偏差”表示。数据经 Excel 2019 初步整理和绘图后，采用 SPSS 26.0 软件进行方差分析，平均数之间采用 Duncan 进行差异显著性分析(P<0.05)。

2　结果与分析

2.1　不同贮藏温度下油炸裹糊牡蛎感官品质的变化

贮藏前的油炸裹糊牡蛎表面色泽金黄，外酥里嫩，味道鲜美，油炸香味、牡蛎及百香果特征风味浓郁，初始感官品质优良。在不同温度下，随着贮藏时间的延长，油炸裹糊牡蛎的表面颜色、质地、风味与总体可接受性均发生劣变，感官品质不断下降，且贮藏温度越高，感官品质下降速度越快，主要表现为表面颜色变浅甚至出现黑斑，表面色泽不均匀，光泽度差；内外层结合变松，外壳的脆度下降，外壳的油腻度提高，内部肉质变干硬；油炸香味、牡蛎及百香果特征风味变淡，出现氨臭味、哈喇味等不良风味。贮藏期间的这些变化与微生物[8]、氧气[8]、水分的“外迁”及油分的“外浸”[6] 等因素有关。

油炸裹糊牡蛎在不同贮藏温度下的感官综合评分变化如图 1 所示。从图 1 可以看出，贮藏于 25、15 和 4 ℃ 下的油炸裹糊牡蛎，其感官综合评分的下降速度分别于贮藏 1、4 和 12 d 后明显加快，其感官综合评分分别于贮藏 3、6 和 15 d 后低于 5 分，达到感官拒绝点，即商业货架期终点。Hassan 等[9] 研究发现一种含牡蛎肉的裹糊、裹糠油炸产品在 5 ℃ 的贮藏条件下于贮藏 14 d 后达到感官拒绝点，与本研究的结果接近。

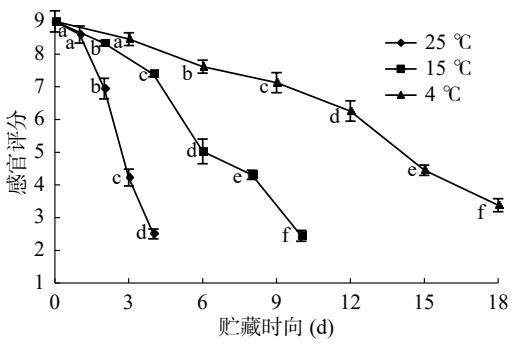

图 1　不同贮藏温度下油炸裹糊牡蛎的感官评分变化

Fig.1　Changes in sensory scores of deep-fried battered and breaded oysters under different storage temperatures

注：不同字母表示差异显著(P<0.05)；图 2~图 4 同。

2.2　不同贮藏温度下油炸裹糊牡蛎 pH 的变化

由图 2 可知，油炸裹糊牡蛎的初始 pH 为 6.24，在不同贮藏温度下，随贮藏时间的延长呈先下降后上升的趋势，这种变化趋势随贮藏温度的降低而有滞后现象；25、15 和 4 ℃ 贮藏条件下，油炸裹糊牡蛎的 pH 分别于贮藏 2、6 和 6 d 后达到最低值 5.98、5.81 和 5.87。李龙飞等[17] 研究牡蛎肉 10 ℃ 贮藏期间 pH 的变化，发现了与本研究一致的趋势。刘远平等[27] 研究发现经超高压处理的牡蛎在 4 ℃ 条件下贮藏期间 pH 也呈先下降后上升的趋势，与本研究结果一致。

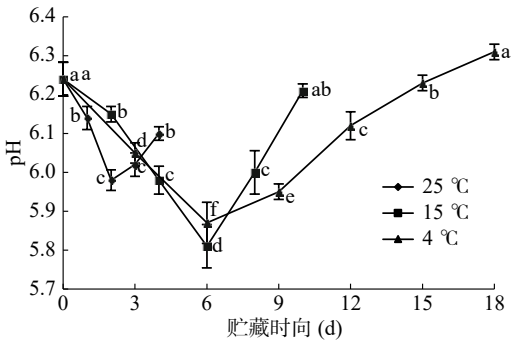

图 2　不同贮藏温度下油炸裹糊牡蛎的 pH 变化

Fig.2　Changes in pH of deep-fried battered and breaded oysters under different storage temperatures

水产品贮藏初期 pH 的下降是由糖原的酵解产生乳酸，ATP 和磷酸肌酸等物质分解产生磷酸等酸性物质导致的；随着贮藏时间的延长，pH 升高是由蛋白质在微生物和酶的作用下分解产生氨、胺类等碱性物质导致的[27]。贮藏温度越高，导致 pH 变化的上述化学反应和微生物繁殖速度越快，pH 变化越快，产品的品质劣变速度越快。

2.3　不同贮藏温度下油炸裹糊牡蛎 TVB-N 含量的变化

TVB-N 是动物性食品由于酶和细菌的作用，在腐败过程中，使蛋白质分解而产生氨以及低级胺类等碱性含氮物质[28]。水产品的 TVB-N 含量与感官品质之间有较高的相关性，常作为水产品的品质评价指标，TVB-N 含量越低，水产品的感官品质越好。油炸裹糊牡蛎的初始 TVB-N 含量为 3.74 mg/100 g，在不同贮藏温度下，其 TVB-N 含量的变化见图 3。

由图 3 可知，TVB-N 含量随贮藏时间的延长而不断增加，且贮藏温度越低，TVB-N 含量增加的速度越慢。这与真空油炸面包虾的 TVB-N 含量变化趋势一致[8]。其原因是贮藏时间延长可以增加蛋白质分解产物的积累，而低温能抑制酶的活性和细菌的生长繁殖，从而延缓蛋白质的分解作用，降低蛋白质分

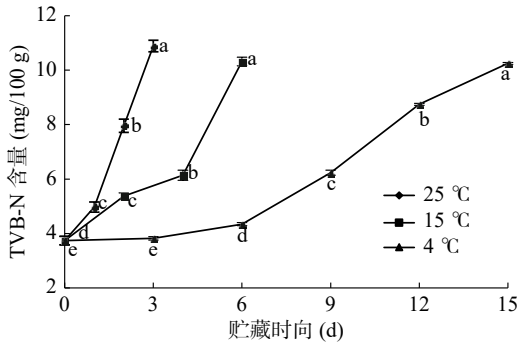

图 3 不同贮藏温度下油炸裹糊牡蛎的 TVB-N 含量变化

Fig.3 Changes in TVB-N contents of deep-fried battered and breaded oysters under different storage temperatures

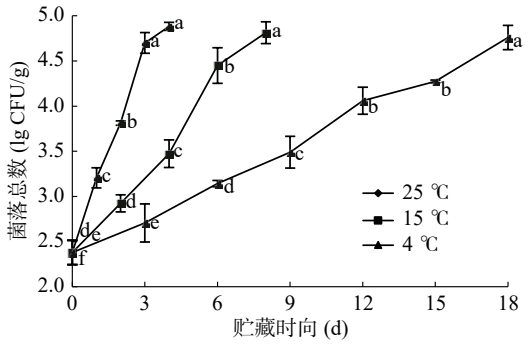

图 4 不同贮藏温度下油炸裹糊牡蛎菌落总数的变化

Fig.4 Changes in aerobic plate count of deep-fried battered and breaded oysters under different storage temperatures

解产物的积累速度。

25、15 和 4 ℃ 贮藏条件下，油炸裹糊牡蛎的 TVB-N 含量分别于贮藏 3、6 和 15 d 后，即各贮藏温度下对应的货架期终点（感官拒绝点）时达到 10.89、10.32 和 10.25 mg/100 g，远低于 GB 10136-2015《食品安全国家标准 动物性水产制品》对于即食动物性水产制品的限量要求 25 mg/100 g[29]。潘广坤等[8]在研究油炸面包虾时也得到了类似的结果。实际上，本研究发现油炸裹糊牡蛎在 25 ℃ 贮藏 9 d 后、15 ℃ 贮藏 18 d 后、4 ℃ 贮藏 21 d 后的 TVB-N 含量分别为 24.24、16.94 和 15.43 mg/100 g，仍远低于 25 mg/100 g，但此时所有贮藏温度下的油炸裹糊牡蛎均已超出感官拒绝点，不再适合食用了。因此，将 25 mg/100 g 作为油炸裹糊牡蛎货架期终点对应的品质指标值不合适。

2.4 不同贮藏温度下油炸裹糊牡蛎菌落总数的变化

微生物是导致食品腐败变质的主要因素之一，菌落总数常被作为评价食品食用安全性的重要指标。油炸裹糊牡蛎的初始菌落总数为 2.38 lg CFU/g，虽较高但仍低于真空油炸脆虾的初始菌落总数 3.05 lg CFU/g[7]。在不同贮藏温度下，其菌落总数的变化如图 4 所示。

由图 4 可知，菌落总数随贮藏时间的延长而不断增加，且贮藏温度越低，菌落总数增加的速度越慢。这与真空油炸面包虾的菌落总数变化趋势一致[8]。其原因是贮藏时间延长可以增加微生物的繁殖数量，而低温能抑制微生物的生长繁殖。

25、15 和 4 ℃ 贮藏条件下，油炸裹糊牡蛎的菌落总数分别于贮藏 3、6 和 15 d 后，即各贮藏温度下对应的货架期终点时达到 4.70、4.45 和 4.27 lg CFU/g，达到或接近 GB 10136-2015《食品安全国家标准 动物性水产制品》对于即食动物性水产制品菌落总数的可接受水平限量值 4.70 lg CFU/g[29]。

从上述分析可知，油炸裹糊牡蛎的货架期较短。鉴于在本研究的工艺条件下制备出的油炸裹糊牡蛎的初始菌落数较高，可考虑通过降低初始菌落数来达到有效延长其货架寿命的目的。研究表明，超高压处理不仅能有效消减牡蛎中的微生物数量，从而起到杀菌保鲜的作用，还能有效抑制牡蛎贮藏过程中 TVB-N 的产生，能使牡蛎的脱壳更简便、高效，能有效保持牡蛎的营养、色泽和风味[30−31]。综上，超高压技术可应用于油炸裹糊牡蛎的生产，起到提高生产效率，改善产品品质的作用。

2.5 油炸裹糊牡蛎货架期预测模型的建立及验证

2.5.1 关键品质指标的选择 根据贮藏过程中油炸裹糊牡蛎各理化及微生物指标与感官评分的实验数据，计算其理化指标与感官评分之间的 Pearson 相关系数，其结果如表 2 所示。

表 2 不同贮藏温度下油炸裹糊牡蛎各理化及微生物指标与感官评分之间的 Pearson 相关系数

Table 2 Pearson correlation coefficients between the physicochemical, microbiological indicators and sensory scores of deep-fried battered and breaded oysters under different storage temperatures

贮藏温度（℃）	pH	TVB-N含量	菌落总数
4	−0.228	−0.961	−0.960
15	0.977	−0.994	−0.990
25	0.750	−0.986	−0.954

从表 2 可以看出，不同贮藏温度下，TVB-N 含量与感官评分之间的 Pearson 相关系数的绝对值均大于 0.96，是所有理化及微生物指标中与感官评分相关性最高的指标，因此，选择 TVB-N 含量作为油炸裹糊牡蛎的关键品质指标，建立基于 TVB-N 含量的货架期预测模型。

2.5.2 不同贮藏温度下油炸裹糊牡蛎 TVB-N 含量变化的动力学模型参数 应用一级反应动力学模型方程式（1）对贮藏期间各贮藏温度下的 TVB-N 含量进行回归拟合，所得动力学模型参数见表 3。由表 3 可知，不同贮藏温度下，TVB-N 含量的一级反应动力学方程回归系数均大于 0.93，表明回归方程拟合度好。

2.5.3 Arrhenius 方程中 k_0 和 $-E_a/R$ 的求取 根据表 3 求得的不同贮藏温度下的反应速率常数 k，以 $1/T$ 为自变量，以 lnk 为因变量，进行线性回归分析，得到线

表 3　不同贮藏温度下油炸裹糊牡蛎 TVB-N 含量变化的动力学模型参数

Table 3　Kinetics model parameters of TVB-N contents of deep-fried battered and breaded oysters under different storage temperatures

贮藏温度(K)	初始值y_0(mg/100 g)	反应速率常数$k(d^{-1})$	回归系数R^2
277	3.2500	0.0751	0.9379
288	3.7075	0.1589	0.9529
298	3.6495	0.3677	0.9910

性回归方程，结合式(3)可计算求出 k_0 和 E_a，其结果如表 4 所示。由表 4 可知，该方程的回归系数大于 0.99，表明该回归方程拟合度好。

表 4　油炸裹糊牡蛎 TVB-N 含量的 Arrhenius 方程中的 k_0 和$-E_a/R$

Table 4　k_0 and $-E_a/R$ in the Arrhenius equation of TVB-N contents of deep-fried battered and breaded oysters

线性回归方程	k_0	$-E_a/R$(K)	回归系数R^2
y=−6219.3x+19.83	4.093×10^8	−6219.3	0.9935

2.5.4　油炸裹糊牡蛎的货架期预测模型　将测得的 TVB-N 含量的初始值 y_0=3.74 mg/100 g，以及求得的 k_0 和$-E_a/R$ 代入式(4)可得油炸裹糊牡蛎的货架期预测方程式(5)。确定了 TVB-N 含量的货架期终点值 y 后，即可通过方程式(5)预测某一贮藏温度下油炸裹糊牡蛎的货架期。此外，若已知某一贮藏温度下贮藏的时间，也可通过方程式(5)预测出该贮藏时间对应油炸裹糊牡蛎的 TVB-N 含量。

$$SL=\frac{ln(y/3.74)}{4.093\times10^8\times exp(-6219.3/T)} \quad 式（5）$$

由 2.3 可知，油炸裹糊牡蛎的 TVB-N 含量在 25、15 和 4 ℃ 贮藏条件下对应的货架期终点时分别为 10.89、10.32 和 10.25 mg/100 g，其平均值为 10.49 mg/100 g，参考潘广坤等[8] 的方法，将此平均值作为油炸裹糊牡蛎货架期终点对应的关键品质指标值 y。将 y=10.49 mg/100 g 代入式(5)可得油炸裹糊牡蛎货架期预测的简化方程式(6)。通过方程式(6)可以预测 4~25 ℃ 范围内某一贮藏温度下的油炸裹糊牡蛎的货架期。

$$SL=2.52\times10^{-9}\times\exp(6219.3/T) \quad 式（6）$$

2.5.5　油炸裹糊牡蛎货架期预测模型的验证　通过比较 4、15 和 25 ℃(即 277、288 和 298 K)贮藏温度下油炸裹糊牡蛎货架期的实测值与货架期预测模型方程式(6)算出的货架期预测值之间的相对误差对货架期预测模型进行验证，其结果见表 5。

从表 5 可知，应用本研究建立的货架期预测模型预测油炸裹糊牡蛎的货架期，其相对误差在 6% 以内，准确率高，可对 4~25 ℃ 贮藏条件下油炸裹糊牡蛎的货架寿命进行较准确的预测。

表 5　不同贮藏温度下油炸裹糊牡蛎货架期预测模型的验证

Table 5　Validation of shelf life prediction model of deep-fried battered and breaded oysters under different storage temperatures

贮藏温度(K)	货架期预测值(d)	货架期实测值(d)	相对误差(%)
277	14.20	15	−5.3
288	6.02	6	0.3
298	2.92	3	−2.7

注：相对误差(%)=(预测值−实测值)×100/实测值

3　结论

不同贮藏温度下，随贮藏时间的延长，油炸裹糊牡蛎的感官评分不断下降，pH 呈先下降后上升的趋势，TVB-N 含量和菌落总数不断增加，且贮藏温度越高，变化越快。

不同贮藏温度下，TVB-N 含量与感官评分之间的 Pearson 相关系数的绝对值均大于 0.96，是 pH、TVB-N 含量和菌落总数中与感官评分相关性最高的指标，以 TVB-N 含量作为关键品质指标建立的一级化学反应动力学方程的回归系数均大于 0.93，建立的 Arrhenius 方程的回归系数大于 0.99，建立的油炸裹糊牡蛎货架期预测模型预测的货架期相对误差小于 6%，可用于快速准确地预测 4~25 ℃ 贮藏条件下油炸裹糊牡蛎的货架寿命，能为油炸裹糊牡蛎产品的工业化生产、贮藏和流通提供理论指导和技术参考。

从产品产业化发展的角度考虑，后续可以进一步将超高压技术应用于油炸裹糊牡蛎的生产，研究超高压处理的工艺条件及其对油炸裹糊牡蛎产品品质和货架期的影响，以期进一步提高产品生产效率，改善产品品质，延长产品货架寿命。此外，裹面包糠后进行包装，然后冷冻，即将牡蛎加工成冷冻半成品上市，最后的油炸环节由消费者自行在家里完成，油炸完后及时享用，以达到最佳的口感与风味；这种冷冻半成品的产品形式顺应消费者的需求，市场前景广阔，后续可以进一步研究这种冷冻半成品在贮藏期间的品质变化规律及货架期预测模型。

参考文献

[1] 陈美花，潘佳丽，翁文治. 油炸温度和时间对裹糊牡蛎品质的影响[J]. 食品与发酵工业，2017，43(12)：124−129.

[2] Kurek M, Ščetar M, Galić K. Edible coatings minimize fat uptake in deep fat fried products: A review[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 71(1): 225−235.

[3] Chen C F, Chen J W, Yuan Z J, et al. Effect of the wheat starch/wheat protein ratio in a batter on fat absorption and quality attributes of fried battered and breaded fish nuggets[J]. Journal of Food Science, 2020, 85(7): 2098−2104.

[4] Zeng H, Chen J W, Zhai J L, et al. Reduction of the fat content of battered and breaded fish balls during deep-fat frying using fermented bamboo shoot dietary fiber[J]. LWT - Food Science and Technology, 2016, 73: 425−431.

[5] Shan J H, Chen J W, Xie D, et al. Effect of xanthan

gum/soybean fiber ratio in the batter on oil absorption and quality attributes of fried breaded fish nuggets[J]. Journal of Food Science, 2018, 83(7): 1832−1838.

[6] 张欢, 董福家, 陈倩, 等. 面糊组分对预油炸微波复热鸡米花品质及水分分布特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(6): 57−62.

[7] 朱由珍, 吉宏武, 刘书成, 等. 真空油炸脆虾包装条件的选择及货架期预测[J]. 广东海洋大学学报, 2018, 38(4): 35−42.

[8] 潘广坤, 吉宏武, 刘书成, 等. 真空油炸面包虾的货架期预测模型[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(3): 113−119.

[9] Hassan F, Joshy C G, Mathew S. Quality evaluation of a battered and breaded seafood product under chilled storage[J]. Fishery Technology, 2013, 50(2): 139−145.

[10] 于修烛, 宋丽娟, 张建新, 等. 薯片在油炸过程中品质变化及其货架期预测[J]. 食品科学, 2012, 33(18): 102−107.

[11] 陈晓宇, 朱志强, 张小栓, 等. 食品货架期预测研究进展与趋势[J]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 192−199.

[12] 袁初蕾. 油炸鱼鳔工艺及货架期研究 [D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2018.

[13] 陈集元. 真空油炸香菇脆片加工工艺的研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2016.

[14] Soto M, Dhuiquemayer C, Servent A, et al. A kinetic study of carotenoid degradation during storage of papaya chips obtained by vacuum frying with saturated and unsaturated oils[J]. Food Research International, 2020, 128: 1−11.

[15] 徐贞, 卢立新. 真空软包装香辣蟹贮藏品质变化及货架期预测[J]. 包装工程, 2017, 38(11): 6−10.

[16] 王娜, 王颉, 孙剑锋, 等. 动力学模型预测即食花蛤的货架寿命[J]. 中国食品学报, 2013, 13(1): 89−94.

[17] 李龙飞, 秦小明, 周翠平, 等. 低温流通牡蛎肉贮藏期品质变化及货架期预测[J]. 渔业现代化, 2014, 41(5): 39−43.

[18] 余立, 林渊智, 段宁宁, 等. 福州鱼丸常温包装条件下货架期模型构建[J]. 包装学报, 2018, 10(4): 56−61.

[19] 李汴生, 黄智君, 张晓银, 等. 冷配送莴笋菜肴的货架期预测模型建立与评价[J]. 现代食品科技, 2015, 31(3): 177−183.

[20] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.237-2016 食品安全国家标准 食品 pH 值的测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1−4.

[21] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.228-2016 食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 3−5.

[22] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 4789.2-2016 食品安全国家标准 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: 1−4.

[23] 殷磊. 即食干制对虾加工工艺及货架期预测 [D]. 保定: 河北农业大学, 2018.

[24] Labuza T P, Shapero M, Kamman J. Prediction of nutrient losses[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 1978, 2(2): 91−99.

[25] Boekel M A J S V. Kinetic modeling of food quality: A critical review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2008, 7(1): 144−158.

[26] Ling B, Tang J, Kong F, et al. Kinetics of food quality changes during thermal processing: a review[J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(2): 343−358.

[27] 刘远平, 史田, 王富龙, 等. 超高压处理对冷藏牡蛎保鲜效果及品质变化的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(15): 325−328.

[28] 鸿巢章二, 桥本周久编; 郭晓风, 邹胜祥译. 水产利用化学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1994: 133−136.

[29] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 10136-2015 食品安全国家标准 动物性水产制品 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015: 1−2.

[30] 李汴生, 黄雅婷, 阮征. 非热杀菌技术在生食水产品中的应用研究进展 [J/OL]. 水产学报: 1−15[2020-09-15]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1283.S.20200703.1029.004.html.

[31] 陈林昀, 李汴生. 超高压处理技术改善牡蛎品质的研究进展 [C]//广东省食品学会、上海博华国际展览有限公司. “健康食品与功能性食品配料”学术研讨会暨 2017 年广东省食品学会年会论文集. 广东省食品学会、上海博华国际展览有限公司: 广东省食品学会, 2017: 37−41.