

不同贮藏温度下半滑舌鳎货架期预测模型 建立与评价

Establishment and evaluation of shelf life prediction model for half-smooth tongue sole (*Cynoglossus semilaevis*) at different storage temperatures

李娜¹ 谢晶^{1,2,3} 梅俊²

LI Na¹ XIE Jing^{1,2,3} MEI Jun²

(1. 上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心, 上海 201306; 2. 上海冷链装备性能与节能评价专业技术服务平台, 上海 201306; 3. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306)

(1. Shanghai Engineering Research Center of Aquatic Product Processing & Preservation, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Professional Technology Service Platform on Cold Chain Equipment Performance and Energy Saving Evaluation, Shanghai 201306, China; 3. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

摘要:为实时监测半滑舌鳎在贮藏期间的品质特性变化及货架期, 分别于 270, 273, 277, 283 K 贮藏半滑舌鳎并定期检测其感官、理化(电导率、滴水损失率、蒸煮损失率、TVB-N 值、K 值)和微生物品质指标的变化规律, 运用一级动力学模型结合 Arrhenius 方程建立各指标随贮藏温度、贮藏时间变化的货架期模型, 并利用 280 K 下的数据验证其准确性。结果表明, 随着贮藏时间的延长感官特性逐渐下降, 而各理化特性、微生物指标呈逐渐上升的变化趋势。另外, 利用各指标构建的动力学模型准确性高, 实测值与预测值的相对误差都低于 ±10%, 特别是通过 TVB-N 值和蒸煮损失率构建的货架期模型准确度更佳。

关键词:半滑舌鳎; 温度; 动力学模型; 货架期

Abstract: To monitor promptly changes of quality characteristics and predict shelf life of half-smooth tongue sole (HTS) fillets during cold store, HTS fillets were stored at 270, 273, 277, 283 K and sensory evaluation, physicochemical properties (electrical conductivity, dripping loss, cooking loss, TVB-N value and K value), and the total viable counts were measured regularly. Besides, the shelf-life model of every index varying with storage temperature and storage time was

基金项目:农业部海水鱼产业体系(编号: CARS-47); 2016 年上海市科技兴农重点攻关项目(编号: 沪农科攻字〔2016〕第 1-1 号); 上海市科委平台能力建设项目(编号: 16DZ2280300); 上海市科委公共服务平台建设项目(编号: 17DZ2293400)

作者简介:李娜, 女, 上海海洋大学在读硕士研究生。

通信作者:谢晶(1968—), 女, 上海海洋大学教授, 博士。

E-mail: jxie@shou.edu.cn

收稿日期:2018-08-01

established by using first-order kinetic model combined with Arrhenius equation, which was further verified using quality changes of HTS fillets at 280 K. The results showed that the sensory evaluation values decreased with the extension of storage time, while the physicochemical and microbial indexes showed an upward trend. Furthermore, the kinetic models constructed with all indexes had excellent accuracy. And the relative error was less than ±10% between predicted shelf life and actually measured shelf life of all indicators, especially the models of TVB-N value and cooking loss. Above results demonstrated that first-order kinetic model combined with Arrhenius equation has great significance and practical guides in the evaluation of quality characteristics and prediction of shelf life of HTS fillets during cold chain logistics process.

Keywords: half-smooth tongue sole (*Cynoglossus semilaevis*); temperature; dynamic model; shelf life

半滑舌鳎(half-smooth tongue sole, HTS)主要分布于亚洲东部, 在中国主要集中于渤海、黄海水域。近年来, 随着养殖技术的日益提高, 半滑舌鳎发展成为中国重要的鲆鲽类经济鱼种, 在中国居民日常饮食中所占比例不断上升。从营养角度出发, 半滑舌鳎中含有的蛋白质易被机体消化吸收, 还含有丰富的不饱和脂肪酸, 矿物质种类丰富^[1-2]。同时, 半滑舌鳎营养物质丰富极易因环境因素的改变而腐败变质, 而失去使用价值。因此, 即时监控半滑舌鳎品质状况对其贮藏、运输、销售具有重要的指导意义。

目前, 动力学模型被广泛应用于食品货架期的预测, 从而达到实时监控其品质特性的目的。其中基于温度变化的

动力学规律结合 Arrhenius 方程被广泛用于生鲜水产品货架期预测模型的研究中,吴奇子等^[3]采用 Arrhenius 方程建立了不同贮藏温度鲈鱼的理化指标随贮藏温度、时间变化的货架期模型,经进一步验证可知所建立的货架期模型可以准确地预测于 273~288 K 贮藏鲈鱼的货架期。雷志方等^[4]比较分析了一级与零级动力学模型结合 Arrhenius 方程构建的货架期模型用于金枪鱼货架期预测的有效性,综合各指标结果得出零级动力学模型结合 Arrhenius 方程更具有优势。Fabiane 等^[5]研究表明零级动力学模型更适用于微生物、理化指标变化,且 Arrhenius 方程适用于零级模型的速度常数更高,可准确预测鱼片货架期。吴行印等^[6]基于理化、微生物检测指标建立了三文鱼各指标的一级动力学模型,利用 Arrhenius 方程拟合度高,经验表明预测值比实际值低 5%,准确性高。但是,目前应用于半滑舌鳎的货架期预测模型研究几乎没有,因此研究其货架期模型的建立具有重要的指导意义。

本试验将新鲜的半滑舌鳎贮藏于不同的温度(270,273,277,283 K),通过检测贮藏期间感官、理化、微生物指标变化,说明其品质特性的变化规律,并建立 270~283 K 的货架期预测模型。同时,利用贮藏于 280 K 的半滑舌鳎对预测模型的适用性验证其有效性,以期为半滑舌鳎在冷链物流过程中品质特性及货架期的预测提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

1.1.1 材料与试剂

半滑舌鳎:购于上海市浦东新区芦潮港水产批发市场,规格基本一致,采用一层碎冰一层半滑舌鳎的方式置于泡沫箱中,30 min 内运回实验室进行后续处理;

高氯酸、氧化镁、甲基红、溴甲酚绿:分析纯,生工生物工程(上海)股份有限公司;

甲醇、磷酸氢二钾、磷酸二氢钾:色谱纯,上海安谱实验科技股份有限公司。

1.1.2 仪器与设备

恒温恒湿箱:BPS-100CB 型,上海一恒科学仪器有限

公司;

电导率仪:FiveEasy Plus 型,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;

凯氏定氮仪:Kjeltec8400 型,丹麦 FOSS 公司;

高效液相色谱仪:Waters e2695 型,美国 Waters 公司;

高速冷冻离心机:H-2050R 型台式,湖南湘怡实验室仪器开发有限公司。

1.2 试验内容

1.2.1 样品前处理 将新鲜半滑舌鳎去头、尾和内脏,取背部肌肉切为 6 cm×4 cm×1 cm 的小块,随机分为 4 组并分装于聚乙烯包装袋中,分别于 270,273,277,283 K 贮藏,定期取样进行各指标检测,其中 283 K 每天进行测定,273,277 K 每 2 d 测定一次,270 K 每 4 d 测定一次,各指标均做 3 次平行,取平均值为最终结果。

1.2.2 感官特性 依据文献[7]的方法,随机选择 10 名(5 名男性,5 名女性)感官评定人员分别从色泽、气味、组织形态、弹性、黏液四个方面对半滑舌鳎鱼块的感官特性进行评估。感官实验室的温度、湿度分别为(293±1) K、(55±2)% ,评分标准见表 1^[8]。

1.2.3 电导率的测定 参照文献[9]的方法,并稍作修改。称取 2.5 g 鱼样于离心管,添加 25 mL 蒸馏水,匀浆并在 3 000 r/min、277 K 离心 5 min,利用电导仪测定上清液的电导率值。

1.2.4 蒸煮损失率的测定 参考文献[10]的方法,略作修改。用刀片切取约 3 cm×3 cm×1 cm 的鱼块,密封并在 353 K 水浴蒸煮 15 min,记录蒸煮前后鱼样的质量(精确到 0.000 1 g),则蒸煮损失率按式(1)计算:

$$CL = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% , \tag{1}$$

式中:

CL——蒸煮损失率,%;

m_1 ——蒸煮前鱼样质量,g;

m_2 ——蒸煮后鱼样质量,g。

1.2.5 滴水损失率的测定 参照参考文献[11]的方法,稍作修改。用刀片切取约 3 cm×3 cm×1 cm 的鱼块,将其置于

表 1 半滑舌鳎感官特性评分标准

Table 1 The standards of sensory characteristics of half-smooth tongue sole

等级	色泽	气味	组织形态	弹性	黏液
极好(5分)	色泽正常,肌肉切面富有光泽	固有香味浓郁	肌肉组织致密完整,纹理清晰	坚实富有弹性,手指按压后凹陷立即消失	无
较好(4分)	色泽正常,肌肉切面稍有光泽	固有香味稍浓郁	肌肉组织紧密,纹理较清晰	坚实有弹性,手指按压后凹陷较快消失	有少许,透明
好(3分)	色泽稍暗淡,肌肉切面有光泽	固有香味清淡,略有异味	肌肉组织不紧密但不松散	较有弹性,手指按压后凹陷消失较慢	多,较透明
一般(2分)	色泽较暗淡,肌肉切面无光泽	固有香味消失,有腥臭味	肌肉组织不紧密,呈部分松散状态	稍有弹性,手指按压后凹陷消失很慢	较多,较浑浊
差(1分)	色泽暗淡,肌肉切面无光泽	有浓重的腥臭味或氨臭味	肌肉组织不紧密,呈松散状态	无弹性,手指按压后凹陷消失很慢或不消失	大量,浑浊

聚乙烯包装袋中放置 1 h,记录放置前后的鱼样质量(精确到 0.000 1 g),按式(2)计算滴水损失率。

$$DL = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

DL——滴水损失率,%;

m_1 ——放置前鱼样质量,g;

m_2 ——放置后鱼样质量,g。

1.2.6 TVB-N 值的测定 按 GB 5009.228—2016《食品安全国家标准 食品中挥发性盐基氮的测定》执行。

1.2.7 K 值的测定 样品前处理参考文献[12]的方法,色谱条件:色谱柱 ODS C_{18} (250 mm \times 4.6 mm),流动相 A 为 100% 甲醇,流动相 B 为 pH 5.7 的磷酸盐缓冲液(0.02 mol/L KH_2PO_4 和 0.02 mol/L K_2HPO_4 等体积混合),样品进样量 20 μ L,流速 1 mL/min,柱温 310 K,波长 254 nm。

1.2.8 菌落总数的测定 按 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》执行。

1.3 数据分析

采用 Origin8.5 对各指标变化趋势进行分析、模型构建及拟合操作,利用 SPSS19.0、Excel 对数据进行统计处理。

2 结果与分析

2.1 品质特性的变化

感官是直接反映水产品颜色、气味、质构等诸多品质特性方面的综合表现指标,也是实际水产品市场中决定消费者购买欲望的决定性因素。相对于色泽、黏液,半滑舌鲷感官品质特性劣变在气味、弹性、组织形态方面变化尤其明显,新鲜的半滑舌鲷感官评分值可达 24.32,表明品质特性良好。由图 1 可知,283 K 贮藏的样品在贮藏期间感官特性急剧下降,于 7 d 后感官已超出可接受范围,而其他温度贮藏的半滑舌鲷感官评分值下降速率明显延缓,特别是 270 K 环境。277 K 贮藏条件下的半滑舌鲷在第 12 天已超过感官可接受极限值,273 K 贮藏的半滑舌鲷达到可接受极限值的时间比 277 K 贮藏环境延长了 3 d,而 270 K 半滑舌鲷在贮藏 12 d 后感官仍保持较好的状态,感官评分接近 19。而且,270 K 的半滑舌鲷在整个贮藏周期感官评分明显低于同时期其他

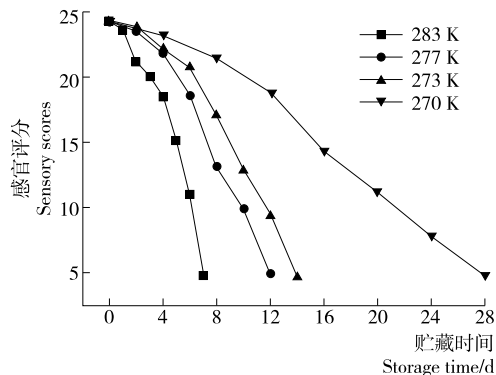
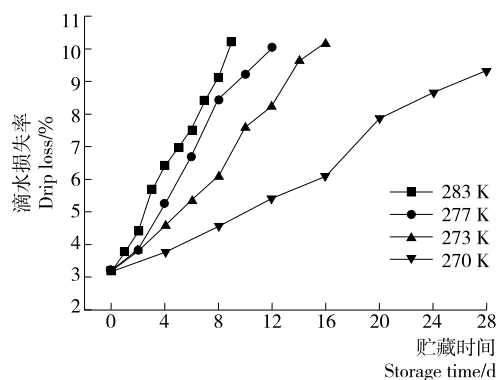


图 1 不同贮藏温度下半滑舌鲷感官评分的变化

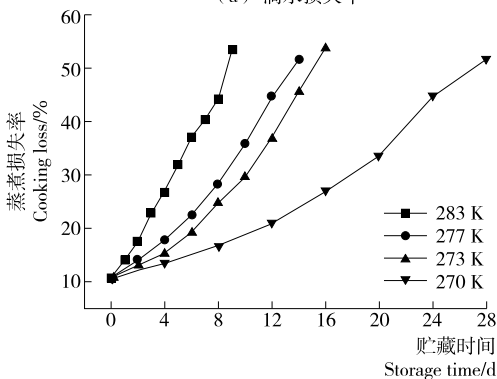
Figure 1 Changes of sensory scores of HTS fillets under different temperature condition

温度贮藏的,这是因为低温贮藏在很大程度上可通过延缓鱼肉内源酶活性引起的各种生化反应及其抑制腐败微生物的生长繁殖,从而长时间保持其实用价值^[13]。

滴水损失、蒸煮损失通常用来反映水产品的保水性能,保水性能的降低也表现为鱼肉在贮藏过程中发生汁液流失现象,从而导致营养物质损失,影响鱼肉的质地和可食用性。据报道^[14],保水性能的降低主要是因鱼肉蛋白质变性引起细胞结构破坏,组织内的水分截留作用随之下降。如图 2 所示,各温度贮藏环境中的半滑舌鲷滴水损失率、蒸煮损失率均逐渐上升,且 283,277 K 贮藏的半滑舌鲷表现为极显著升高($P < 0.01$),与新鲜的半滑舌鲷相比较,283,277 K 条件下贮藏的半滑舌鲷在前 9 d 滴水损失率分别增加了 68.79%, 68.36%,而蒸煮损失率分别增加了 80.39%, 79.80%。相较于 283,277,273 K 贮藏的半滑舌鲷随着贮藏时间的延长而显著增长($P < 0.05$),其中滴水损失率在贮藏 12 d 后由最初的 3.18% 上升为 8.24%,蒸煮损失率也由最初的 10.18% 增加为 36.93%。而 270 K 贮藏的鱼样在前 12 d 变化不明显,随后表现为显著增长($P < 0.05$),在贮藏 28 d 后滴水损失率才达到 9.34%,此时蒸煮损失率为 44.77%,保水性能明显优于其他温度贮藏。由于内源性酶活性直接影响蛋白质的变性速率及变性程度^[15],以上的试验结果说明贮藏期间降低温度可很大程度上降低酶活性,从而抑制蛋白质降解变性,保持其原有结构的稳定性,减少营养物质的流失。同时,



(a) 滴水损失率



(b) 蒸煮损失率

图 2 不同贮藏温度下半滑舌鲷滴水损失率、蒸煮损失率的变化

Figure 2 Changes of drip loss and cooking loss of HTS fillets under different temperature condition

经相关性研究,滴水损失与蒸煮损失率相关系数可达0.973 8,说明这两者在表征半滑舌鳎保水性能方面具有良好的相关性。

水产品营养物质丰富的特性使其肌肉中含有的蛋白质、脂质等营养物质极易因外源性微生物蛋白酶的作用而分解产生小分子物质,其中离子及带电基团浓度会随之增加,表现为电导率的升高^[16]。图3可明显看出,283,277,273 K贮藏环境中的半滑舌鳎电导率随着贮藏时间的延长而迅速增加($P < 0.05$),且增长速率随着温度的升高而加快。270 K环境下的半滑舌鳎电导率值在贮藏前期增长缓慢,在贮藏12 d时仅为1.64 mS/cm,此时277,273 K条件下的鱼样已经分别达到3.16,2.61 mS/cm,而283 K环境下的半滑舌鳎电导率在贮藏8 d后即可达到3.52 mS/cm,表明低温贮藏对抑制营养物质降解方面具有明显优势,这也符合前面保水性的研究结果,同时与刘彩华等^[16]的研究结果也一致。

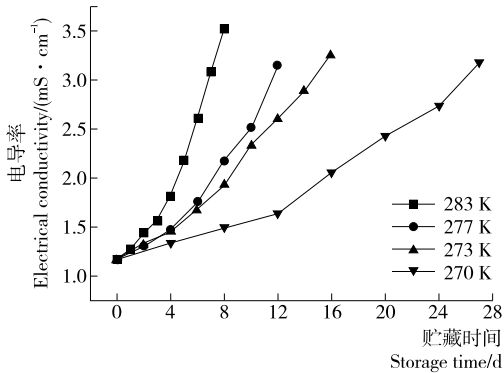


图3 不同贮藏温度下半滑舌鳎电导率的变化

Figure 3 Changes of electrical conductivity of HTS fillets under different temperature condition

TVB-N值用来衡量蛋白质受腐败菌和蛋白质分解酶影响而分解的肽、氨基酸等经进一步反应最终生成的氨、胺类等具有挥发性的含氮物质含量,在衡量水产品品质特性及预测货架期中具有重要的参考价值^[17]。如图4所示,初始的TVB-N值仅为9.86 mg N/100 g,随着贮藏时间的延长,其增长速率随着温度的降低而下降,各组在贮藏前4 d无明显差异($P > 0.05$)。随后283 K条件下TVB-N值增长极显著($P < 0.01$),在贮藏第8天已达到32.53 mg N/100 g,超过通常在水产品中规定的30 mg N/100 g极限值。此时相比较于283 K,277,273,270 K的半滑舌鳎TVB-N值分别为18.02,16.12,12.53 mg N/100 g,仍处于二级鲜度范围。对于270 K贮藏的半滑舌鳎,其TVB-N值的增长速率在整个试验周期都相对平缓,直至28 d后才超出可接受极限值(33.68 mg N/100 g),这是由于低温限制了相关酶的活性,减缓了蛋白质分解速率而蛋白质特性保持相对稳定,从而保持了半滑舌鳎的良好品质特性。

K值作为一种常用的水产品新鲜度评价指标,主要衡量的是腺苷三磷酸(ATP)由于自溶现象经一系列分解生成次黄嘌呤核苷(HxR)、次黄嘌呤(Hx)在ATP及相关化合物总量中所占的比重,可直接影响水产品的风味特性^[18-19]。根

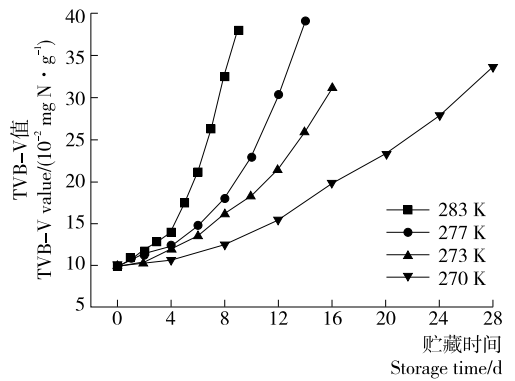


图4 不同贮藏温度下半滑舌鳎TVB-N值的变化

Figure 4 Changes of TVB-N value of HTS fillets under different temperature condition

据文献^[20]报道,K值低于20%,产品处于一级鲜度,品质特性良好;处于20%与40%之间时,为二级鲜度范围,适宜食用;超过40%,产品开始进入腐败状态,高于60%则认为不可食用。从图5可看出,新鲜半滑舌鳎的K值为11.23%,283 K贮藏条件下的K值急剧增长($P < 0.01$),贮藏8 d后即超出所规定的食用可允许值(52.83%)。其他温度贮藏的半滑舌鳎K值变化速率有所降低,且270 K条件下的增长速率明显低于277,273 K,直至贮藏16 d后增长速率才开始大幅度上升($P < 0.05$),其值在贮藏16~28 d过程中增长了53.45%,很大程度上减缓了ATP的降解。若K值以50%作为可接受极限值,则283,277,273,270 K贮藏的半滑舌鳎超过可食用范围的时间分别为8,12,16,28 d,可见降低贮藏温度可明显延缓ATP的降解程度,特别是270 K。

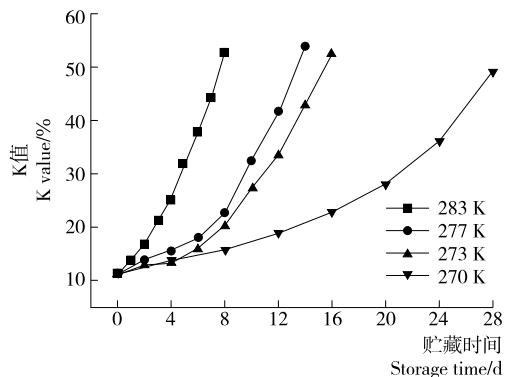


图5 不同贮藏温度下半滑舌鳎K值的变化

Figure 5 Changes of K value of HTS fillets under different temperature condition

腐败菌的生长繁殖是引起水产品品质特性劣变的重要因素^[21]。由图6可得出,所有组别的菌落总数均呈一致的变化趋势:菌落总数随着贮藏时间的延长而逐渐上升,且增长速率随温度的升高而增加,这与之前TVB-N值、K值等理化指标的结果相一致。283 K在贮藏8 d时的菌落总数已达7.26 lg CFU/g,而同时期在277,273,270 K环境的半滑舌鳎菌落总数分别为5.69,4.63,3.47 lg CFU/g,充分表明了低温贮藏在抑制半滑舌鳎腐败菌的生长繁殖方面具有明显的优势。若以菌落总数作为半滑舌鳎货架期的判断指标,则

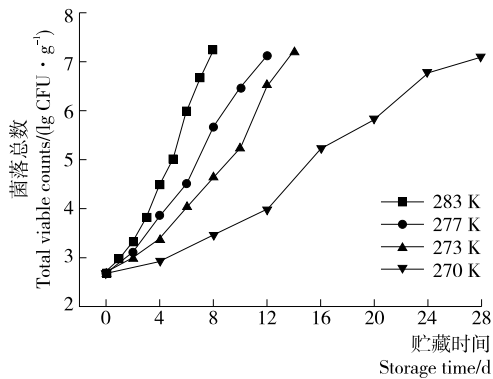


图 6 不同贮藏温度下半滑舌鲷菌落总数的变化

Figure 6 Changes of total viable count of HTS fillets under different temperature condition

283 K 贮藏的半滑舌鲷货架期为 7 d, 277, 273, 270 K 条件下的货架期分别延长了 4~5, 6~7, 18~21 d, 可见贮藏温度越低, 半滑舌鲷货架期的延长效果越明显。

2.2 货架期预测模型的建立

为实时监控食品品质随着贮藏时间、温度的变化规律以及对食品货架期的预测, 数学动力学模型是一种有效的工具和手段, 具有广泛的应用前景。已有大量文献^[6, 22-24]指出一级动力学模型结合 Arrhenius 方程在预测水产品货架期中具有良好的准确性, 在实际冷链物流过程中具有重要的应用价值。一级动力学如下:

$$\pm \frac{dA}{dt} = k \times A^n, \quad (3)$$

经换算得

$$A = A_0 \times e^{kt}, \quad (4)$$

式中:

t ——贮藏时间, d;

A ——贮藏 t 时间时的品质指标数值;

A_0 ——品质指标初始值;

k ——品质变化速率常数;

n ——反应级数 ($n=1$)。

而贮藏温度与品质变化速率常数之间的 Arrhenius 方程为:

$$k = k_0 \times \exp\left(-\frac{E_A}{R \times T}\right), \quad (5)$$

式中:

k ——品质变化速率常数;

k_0 ——指前因子;

E_A ——活化能, kJ/mol;

R ——气体常数;

T ——热力学温度, K。

综合式(4)、(5)可得:

$$t = \frac{\ln A - \ln A_0}{k_0 \times \exp\left(-\frac{E_A}{R \times T}\right)}. \quad (6)$$

从以上可知, 若已知品质指标初始值 A_0 、可接受极限值 A_0 及贮藏温度 T , 只要求出 k_0 、 E_A 值, 即可得到某一贮藏温

度下半滑舌鲷的货架期。

试验中将各理化、微生物指标进行非线性拟合, 所得动力学模型及相对应的反应速率常数 k 、回归系数 R^2 见表 2。从表 2 中可知, 一级动力学模型针对于各指标的拟合度都比较高 ($R^2 > 0.95$), 充分表明其可很好地预测半滑舌鲷随贮藏温度、时间变化而发生的品质特性改变状况。此外, 对于同一品质指标, 反应速率常数 k 值随着贮藏温度的下降而降低, 这也进一步说明了降低贮藏温度可一定程度上减缓贮藏期间肌肉中各反应速率。

根据式(5)将以上各指标针对的 k 值对不同温度进行拟合, 结果如表 3, 则各指标所建立的货架期预测模型:

$$t_E = \frac{\ln A_E - \ln A_{E0}}{1.987 \times 10^{10} \times \exp\left(-\frac{60,233}{R \times T}\right)}, \quad (7)$$

$$t_D = \frac{\ln A_D - \ln A_{D0}}{7.112 \times 10^6 \times \exp\left(-\frac{41,527}{R \times T}\right)}, \quad (8)$$

$$t_C = \frac{\ln A_C - \ln A_{C0}}{2.793 \times 10^6 \times \exp\left(-\frac{38,432}{R \times T}\right)}, \quad (9)$$

表 2 不同贮藏温度下半滑舌鲷各品质指标随贮藏时间变化的动力学模型参数

Table 2 Kinetic model parameters for all quality indexes of HTS fillets under different temperature condition

检测指标	贮藏温度/K	回归方程	反应速率常数 k	回归系数 R^2
电导率	283	$A = 1.053e^{0.151t}$	0.151 ± 0.006	0.991 47
	277	$A = 1.075e^{0.088t}$	0.088 ± 0.004	0.989 94
	273	$A = 1.162e^{0.065t}$	0.065 ± 0.002	0.993 78
	270	$A = 1.126e^{0.037t}$	0.037 ± 0.001	0.992 89
滴水损 失率	283	$A = 3.724e^{0.115t}$	0.115 ± 0.007	0.970 90
	277	$A = 3.694e^{0.089t}$	0.089 ± 0.010	0.969 74
	273	$A = 3.503e^{0.07t}$	0.070 ± 0.004	0.980 80
蒸煮损 失率	270	$A = 3.397e^{0.038t}$	0.038 ± 0.003	0.973 75
	283	$A = 13.593e^{0.155t}$	0.155 ± 0.012	0.961 56
	277	$A = 11.827e^{0.108t}$	0.108 ± 0.004	0.993 40
TVB-N	273	$A = 10.62 e^{0.103t}$	0.103 ± 0.002	0.997 99
	270	$A = 10.83 e^{0.057t}$	0.057 ± 0.002	0.994 00
	283	$A = 7.821e^{0.175t}$	0.175 ± 0.009	0.982 85
K 值	277	$A = 7.922e^{0.112t}$	0.112 ± 0.006	0.982 33
	273	$A = 8.676e^{0.079t}$	0.079 ± 0.003	0.991 65
	270	$A = 9.083e^{0.047t}$	0.047 ± 0.001	0.996 08
菌落总数	283	$A = 12.000e^{0.187t}$	0.187 ± 0.004	0.996 67
	277	$A = 11.034e^{0.132t}$	0.132 ± 0.004	0.995 22
	273	$A = 9.047e^{0.11t}$	0.110 ± 0.004	0.991 20
	270	$A = 9.746e^{0.056t}$	0.056 ± 0.003	0.983 24
	283	$A = 2.643e^{0.13t}$	0.130 ± 0.004	0.993 27
	277	$A = 2.791e^{0.081t}$	0.081 ± 0.005	0.981 51
	273	$A = 2.577e^{0.074t}$	0.074 ± 0.003	0.992 60
	270	$A = 2.700e^{0.037t}$	0.037 ± 0.003	0.969 97

表3 不同贮藏温度下半滑舌鲷各品质指标的 Arrhenius 方程参数

Table 3 Parameters of Arrhenius equation for all quality indexes of HTS fillets under different temperature condition

指标	指前因子 k_0	活化能 $E_A/$ ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)	决定系数 R^2
电导率	1.987×10^{10}	60.233	0.981 98
滴水损失率	7.112×10^6	41.527	0.956 70
蒸煮损失率	2.793×10^6	38.432	0.965 02
TVB-N 值	3.559×10^9	55.818	0.994 29
K 值	4.498×10^7	45.358	0.984 04
菌落总数	1.462×10^8	49.024	0.978 83

A_T ——贮藏时间为 t 时的 TVB-N 值, $\text{mg N}/100 \text{ g}$;
 A_K ——贮藏时间为 t 时的 K 值, %;
 A_B ——贮藏时间为 t 时的菌落总数, lg CFU/g ;
 A_{E_0} ——电导率的初始值, mS/cm ;
 A_{D_0} ——滴水损失率的初始值, %;
 A_{C_0} ——蒸煮损失率的初始值, %;
 A_{T_0} ——TVB-N 值的初始值, $\text{mg N}/100 \text{ g}$;
 A_{K_0} ——K 值的初始值, %;
 A_{B_0} ——菌落总数的初始值, lg CFU/g 。

利用以上货架期预测模型,若已知贮藏温度、品质指标的初始值以及贮藏特定时间后的品质指标值即可得到半滑舌鲷剩余的货架期,可很好地达到实时监控半滑舌鲷品质的目的。

2.3 货架期预测模型的验证

本研究前面以 270, 273, 277, 283 K 4 个具有代表性的水产品贮藏温度为基础,建立了 270~283 K 的货架期模型,为进一步验证所得货架期模型准确性,选取 280 K 贮藏的半滑舌鲷对货架期预测模型的适用性进行验证,其中电导率、滴水损失、蒸煮损失、TVB-N 值、K 值、菌落总数分别以 3.0 mS/cm 、10%、50%、30 $\text{mg N}/100 \text{ g}$ 、50%、7 lg CFU/g 为货架期终点,检测各指标实测值与预测值之间的误差。从半滑舌鲷品质特性出发,试验中发现贮藏于 280 K 的半滑舌鲷感官、理化、微生物指标变化趋势与其他温度一致,且变化速率介于 283K 与 277 K 之间,这也进一步证明了降低贮藏温度可延缓半滑舌鲷的腐败变质,与前面的结果相吻合。从货架期预测模型角度出发,由表 4 可知,280 K 贮藏环境条件下半滑舌鲷的货架期实测值与预测值的相对误差都低于 $\pm 10\%$,特别是用电导率、TVB-N 值、蒸煮损失率构建的模型准确度比其他指标更优(低于 5%),而用滴水损失率建立的货架期模型准确度最低,相对误差可达 -8.43%。总之,上述构建的货架期模型具有较好的准确度,可快速、实时、准确地预测 270~283 K 任一贮藏条件下半滑舌鲷的货架期。

表4 280 K 温度贮藏过程中货架期预测值与实测值的相对误差

Table 4 Relative error of predicted and observed shelf-life for HTS fillets at 280 K during refrigerated period

组别	电导率/d	滴水损失率/d	蒸煮损失率/d	TVB-N 值/d	K 值/d	菌落总数/d
实测值	8.6	8.3	8.7	8.5	9.1	8.7
预测值	8.2	9.0	8.3	8.1	9.6	9.2
相对误差	4.65%	-8.43%	4.60%	4.71%	-5.21%	-5.75%

3 结论

为实时监测半滑舌鲷随贮藏温度、贮藏时间改变的品质特性变化规律及预测货架期,本试验研究了不同贮藏温度下半滑舌鲷的感官、理化和微生物品质特性,表明随着贮藏时间的延长,感官特性呈下降趋势,而电导率、滴水损失率、蒸煮损失率、TVB-N 值、K 值呈逐渐上升的趋势,且降低贮藏温度可明显延缓各指标的变化速率。同时,利用一级动力学模型结合 Arrhenius 方程建立的各品质指标货架期预测模型具有很好的准确度,预测值与实测值之间的相对误差低于

$\pm 10\%$,特别是利用 TVB-N 值和蒸煮损失率构建的货架期预测模型用于实时监测半滑舌鲷品质特性具有更大的优势,这在实际半滑舌鲷冷链物流过程中用于货架期的预测中具有重要的指导意义。

本研究中鱼样在贮藏期间始终保持温度恒定,但实际冷链物流过程中温度经常波动变化,因此关于海产品在温度波动环境下货架期预测模型的研究更加具有现实指导作用,这也会是未来海产品货架期实时监测的重要发展方向。同时,海产品在贮藏前期、中期、末期不同的贮藏阶段,各品质指标的敏感性可能存在差异,建立基于多指标的货架期预测模型

可更准确地表征海产品在贮藏期间的品质状态,具有更广阔的应用前景。

参考文献

- [1] SI Yu-feng, WEN Hai-shen, LI Yun, et al. Liver transcriptome analysis reveals extensive transcriptional plasticity during acclimation to low salinity in *Cynoglossus semilaevis*[J]. *Bmc Genomics*, 2018, 19(1): 464.
- [2] 张伟. 地下深井水及水温对半滑舌鳎生长发育的影响[J]. *水产养殖*, 2018, 39(5): 1-2.
- [3] 吴奇子, 陈雪, 刘欢, 等. 不同贮藏温度条件下鲈鱼货架期预测模型的构建[J]. *食品科学*, 2015, 36(22): 232-236.
- [4] 雷志方, 谢晶. 金枪鱼基于理化指标的货架期预测模型的建立[J]. *食品与发酵工业*, 2015, 41(11): 185-191.
- [5] RAMOS F C P, RIBEIRO S C A, JOELE M R S P, et al. Kinetic modeling to study the quality of tambaqui (*Colossoma macropomum*) sous vide during storage at different temperatures[J]. *J Food Sci Technol*, 2017, 54(8): 2 452-2 463.
- [6] 吴行印, 谢晶, 张新林, 等. 动力学模型预测三文鱼在不同温度的货架期[J]. *包装工程*, 2017(3): 1-6.
- [7] BAHRAM S, REZAIIE M, SOLTANI M, et al. Effect of whey protein concentrate coating cinamon oil on quality and shelf life of refrigerated beluga sturgeon (*Huso huso*) [J]. *Journal of Food Quality*, 2016, 67(12): 28-34.
- [8] 李敬, 韩冬娇, 刘红英. 复合生物保鲜剂对半滑舌鳎保鲜效果的研究[J]. *河北农业大学学报*, 2016, 39(1): 84-88.
- [9] 李婷婷, 陈思, 李欢, 等. 冷藏鲑鱼优势腐败菌致腐能力的初步分析[J]. *食品与发酵工业*, 2017, 43(6): 140-145.
- [10] 朱文慧, 宦海珍, 步营, 等. 不同解冻方式对秘鲁鲑鱼肌肉保水性和蛋白质氧化程度的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(11): 6-11.
- [11] MU Gang, BERGSSON A B, JONSSON A, et al. The effects of ambient temperature and holding time during processing on drip of saithe (*Pollachius virens*) and deepwater redfish (*Sebastes mentella*) fillets[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 200: 40-46.
- [12] 于林, 陈舜胜, 王娟娟, 等. 茶多酚改性胶原蛋白-壳聚糖复合膜对冷藏斜带石斑鱼的保鲜效果[J]. *食品科学*, 2017, 38(3):

220-226.

- [13] 苏辉, 谢晶, 黎柳, 等. 不同温度下鲳鱼品质及微观组织的变化研究[J]. *现代食品科技*, 2014(8): 106-111.
- [14] 郑捷, 尚校兰, 刘安军. 超高压对海鲈鱼鱼肉的蒸煮损失及蛋白质降解程度的影响[J]. *天津科技大学学报*, 2013(1): 10-13.
- [15] 卢涵. 鲷鱼肉低温贮藏过程中蛋白氧化、组织蛋白酶活性与品质变化规律的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017: 16-18.
- [16] 刘彩华, 邱恒恒, 朱新荣, 等. 冷藏温度对白斑狗鱼肌肉质构特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2017, 43(12): 137-143.
- [17] 曾名勇, 黄海, 李八方. 不同冻藏温度对鲈鱼肌肉蛋白质生化特性的影响[J]. *中国海洋大学学报: 自然科学版*, 2003, 33(4): 525-530.
- [18] SONG Yong-ling, LIU Lei, SHEN Hui-xing, et al. Effect of sodium alginate-based edible coating containing different anti-oxidants on quality and shelf life of refrigerated bream (*Megalobrama amblycephala*) [J]. *Food Control*, 2011, 22(3): 608-615.
- [19] MOHAN C O, RAVISHANKAR C N, LALITHA K V, et al. Effect of chitosan edible coating on the quality of double filleted Indian oil sardine (*Sardinella longiceps*) during chilled storage[J]. *Food Hydrocolloids*, 2012, 26(1): 167-174.
- [20] STOREAKKEN T, FOSS P, SCHIEDT K, et al. Carotenoids in diets for salmonids IV: Pigmentation of Atlantic salmon with astaxanthin, astaxanthin dipalmitate and canthaxanthin[J]. *Aquaculture*, 1987, 65(3): 279-292.
- [21] FENG Xiao, NG V K, MIKS K M, et al. Effects of fish gelatin and tea polyphenol coating on the spoilage and degradation of myofibril in fish fillet during cold storage [J]. *Food & Bioprocess Technology*, 2017(10): 1-14.
- [22] 王文娟, 汪水平, 李代金, 等. 不同贮藏温度齐口裂腹鱼肌肉品质的变化及货架期预测[J]. *食品科学*, 2014, 35(14): 229-233.
- [23] 鞠健, 胡慧慧, 熊光权, 等. 基于空气(普通包装)和真空包装条件下鲈鱼片脂肪氧化指标建立鲈鱼货架期预测模型[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(6): 191-198.
- [24] SHI Ce, HAN Lu, CUI Jian-yun, et al. Study on the predictive models of the quality of Silver Carp (*Hypophthalmichthys Molitrix*) fillets stored under variable temperature conditions[J]. *Journal of Food Processing & Preservation*, 2014, 38(1): 356-363.

(上接第 100 页)

- [18] 伞红军, 钟诗胜, 王知行. 一种新型五轴并串联机床的工作空间分析[J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2010, 42(2): 243-249.
- [19] 李庆兴, 刘淑英, 范顺成, 等. 正交结构 6-PP+S 并联机构的工作空间分析[J]. *天津大学学报*, 2009, 42(6): 560-565.
- [20] 李秦川, 孙晓东, 陈巧红, 等. 2-PRS-PRRU 并联机构运动学与奇异分析[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(3): 21-27.
- [21] 黄真, 孔令富, 方跃法. 并联机器人机构学理论及控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997: 72-80.
- [22] LI Yang-ming, XU Qing-song. Kinematic analysis of a 3 PRS parallel manipulator [J]. *Robotics and Computer-Integrated*

Manufacturing, 2007, 23(4): 395-408.

- [23] LEE K M, SHAH D K. Kinematic analysis of a three-degree-of-freedom in parallel actuated manipulator[J]. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1988, 4(3): 354-356.
- [24] 季晔, 刘宏昭, 原大宁. 4-SPS/PPU 型并联机构工作空间与尺度分析[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(11): 322-328.
- [25] 鲁开讲, 牛禄峰, 刘亚茹, 等. 3-RPS 并联机构奇异位形及工作空间研究[J]. *农业机械学报*, 2007(5): 143-146.
- [26] 黄宇中, 张宗明, 何奇伟. 机器人灵活工作空间的边界分析[J]. *机器人*, 1991(2): 18-24.
- [27] 刘迎春, 余跃庆, 姜春福. 机器人可操作性研究进展[J]. *机械设计*, 2003(4): 34-37, 7.