

# 冷熏三文鱼单增李斯特菌热灭菌规律及其品质变化动力学研究

史亚歌<sup>1</sup>, 刘拉平<sup>1</sup>, 岳田利<sup>1</sup>, 唐炬明<sup>2</sup>, 王绍金<sup>3</sup>

(1. 西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西杨凌 712100)(2. 华盛顿州立大学生物工程系, 美国普尔曼 WA 99164-6120)(3. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 为了给冷熏三文鱼热灭菌提供理论依据, 试验研究了热处理对冷熏三文鱼中单增李斯特菌失活及品质变化影响。将接种了一株单增李斯特菌(ATCC19113)菌液的鱼肉密封于毛细管中, 分别在58℃、60℃、62℃、64℃和66℃条件下加热处理18 min、8.8 min、4 min、2 min和1 min, 考察不同温度条件下存活菌数变化。采用铝制密封加热单元(直径35 mm×高6 mm)研究了冷熏三文鱼(直径30 mm×高6 mm)在50℃、57℃、64℃和70℃条件下加热处理120 min、90 min、60 min和40 min时的品质变化。结果表明: 单增李斯特菌的热失活曲线遵循对数线性关系( $R^2 \geq 0.94$ ); 冷熏三文鱼品质指标加热失重率、 $a^*$ 值、 $b^*$ 值及剪切力遵循1级反应动力学规律,  $L^*$ 值遵循0级反应动力学规律; 冷熏三文鱼色值 $a^*$ 与单增李斯特菌热失活密切相关, 色值 $a^*$ 品质劣变曲线与单增李斯特菌(ATCC19113)死亡曲线重叠区域为热处理温度与时间组合可操作范围, 此范围可同时满足杀菌及品质保持要求。

**关键词:** 冷熏三文鱼; 单增李斯特菌; 热失活; 品质变化; 动力学

文章编号: 1673-9078(2015)6-156-163

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.6.025

## Thermal Sterilization of *Listeria Monocytogenes* and Kinetics of Quality Changes in Cold Smoked Salmon

SHI Ya-ge<sup>1</sup>, LIU La-pin<sup>1</sup>, YUE Tian-li<sup>1</sup>, TANG Ju-ming<sup>2</sup>, WANG Shao-jin<sup>3</sup>

(1.College of Food Science and Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

(2.Department of Biological Systems Engineering, Washington State University, Pullman, WA 99164-6120, USA)

(3.College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** In order to provide a theoretical foundation for the thermal sterilization of cold smoked salmon, the influence of heat treatments on the inactivation of *Listeria monocytogenes* and the changes in the quality of cold smoked salmon were investigated. A sample of cold smoked salmon inoculated with a strain of *L. monocytogenes* (ATCC19113) was sealed in a capillary tube, and subjected to heat treatment at 58 °C, 60 °C, 62 °C, 64 °C, and 66 °C for 18 min, 8.8 min, 4 min, 2 min, and 1 min, respectively. The changes in viable bacterial cell count at the different temperatures was monitored. Small samples (D 30 mm × H 6 mm) were sealed in an aluminium heating unit (D 35 mm × H 6 mm) and heated in a water bath at 50 °C, 57 °C, 64 °C, and 70 °C for 120 min, 90 min, 60 min, and 40 min, respectively. The corresponding changes in quality were studied. The results showed that the inactivation curve exhibited a logarithmic linear relationship ( $R^2 \geq 0.94$ ). The quality indexes of cold smoked salmon, including cooking loss, the  $a^*$  value,  $b^*$  value, and the shear force followed first-order reaction kinetics, while the  $L^*$  value followed zero-order reaction kinetics. As the  $a^*$  value of cold smoked salmon was closely linked to thermal inactivation of *L. monocytogenes*, the overlapping region between thermal-death-time curves of *L. monocytogenes* (ATCC19113) and the  $a^*$  quality deterioration curve was the operational range to carry out the combination of temperature and heat treatment time, which could meet the requirements for sterilization without deteriorating quality of cold smoked salmon.

**Key words:** cold smoked salmon; *Listeria monocytogenes*; thermal inactivation; quality changes; kinetics

收稿日期: 2014-09-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(31371814); 陕西省科学技术研究发展计划(2024K13-15)

作者简介: 史亚歌(1976-), 女, 博士, 讲师, 主要从事食品与农产品加工技术研究

通讯作者: 岳田利, 男, 博士, 教授, 主要从事食品生物技术及食品安全控制技术研究

冷熏三文鱼采用低温熏制而成,肉质柔嫩、口感上佳,含有丰富的不饱和脂肪酸,深受消费者欢迎<sup>[1]</sup>。但在加工和贮藏过程中,冷熏三文鱼易受单增李斯特菌的交叉感染<sup>[2-3]</sup>。李斯特菌是一种重要的人畜共患疾病病原体,具有耐热(60℃)、耐低温(4℃)、耐盐、耐干燥等特性<sup>[4]</sup>;一旦人体食用李斯特菌污染的食品,其死亡率高达20%~30%<sup>[5]</sup>。因此,采用有效的方法进行冷熏三文鱼李斯特菌灭菌处理对该种产品的加工、贮藏以及食用具有重要的意义。目前,食品生产应用的灭菌方法种类很多,包括以热处理、辐射、过滤等手段为主的物理法,以各种防腐剂和抑菌剂为核心的化学法,还有以微生物抗生素及其拮抗等为基础的生物学控制法等。虽然灭菌方法多种多样,但热处理技术简单有效、经济实惠,依然是工业化生产中应用最多的方法<sup>[6-7]</sup>。

热处理技术作为一种安全、环保、无化学残留的食品加工方法,广泛应用于食品及农产品的干燥、杀菌及灭酶处理;尤其近年来兴起以微波与射频波为主的介电加热,在食品杀菌及灭酶等方面更具有潜在应用优势<sup>[8-11]</sup>。在热处理过程中,食品杀菌、钝酶和品质劣变3种反应同时发生,但微生物、酶及品质指标对温度变化敏感性不同,要提高食品热处理的有效性,需兼顾热处理灭菌效果和对产品品质的影响。因此,对产品热处理过程中杀菌、品质变化动力学规律进行研究,进而建立不同反应过程的动力学模型,可为食品加工热处理工艺提供重要依据。

Sheen等开展了微波热杀灭鲑鱼中食源性菌的研究,结果表明该方法具有较强的可行性<sup>[12]</sup>。Embarek等人研究发现,对鳕鱼和三文鱼片中李斯特菌进行58~70℃热失活具有非常好的效果<sup>[13]</sup>。Skipnes等研究了大西洋鳕鱼在20~95℃不同时间等温热处理时,鱼肉的加热失重率、色值、质构及持水性等指标定量变化<sup>[14]</sup>。但对于冷熏三文鱼与单增李斯特菌的热力学研究未见报道。本研究采用等温热处理方法,研究温度、时间对冷熏三文鱼单增李斯特菌杀灭以及产品品质的影响,进而建立适合的三文鱼单增李斯特菌灭菌与品质变化的动力学模型,为优化灭菌工艺提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

冷熏三文鱼,购于美国华盛顿州普尔曼当地超市(Wild Alaska Sockeye smoked salmon),保存于-20℃,使用前4℃条件下解冻。样品的主要指标为:pH5.64,水分含量67.54%、盐含量2.08%,水分活度0.96。

### 1.2 主要试剂和仪器

电子天平(AL204,瑞士梅特勒公司)、TA-XT2i物性测定仪(英国Stable Micro System公司)。

### 1.3 冷熏三文鱼单增李斯特菌培养及灭活

#### 1.3.1 单增李斯特菌准备

单核细胞增生李斯特标准菌株(ATCC19113),美国华盛顿州立大学食品科学系食品微生物实验室保存菌株。首先,将标准菌株接种于PALCAM培养基中,37℃条件下培养24h,连续活化2次。然后,从活化的PALCAM培养基表面挑取单菌落到装有50mL已灭菌的TSB-YE肉汤培养基中(250mL),37℃条件下培养24h。最后,将单增李斯特菌细胞悬浮液于2500r/min,4℃条件下离心30min,得到的菌体用质量分数为0.1%的蛋白胍缓冲液冲洗,相同条件下再次离心一次并洗涤,弃去上清液,用质量分数0.1%的蛋白胍缓冲液重悬至5mL,得到浓度为 $10^8 \sim 10^9$  CFU/mL细胞悬浮液,4℃恒温箱中保存备用。

#### 1.3.2 冷熏三文鱼的接菌

取10g均匀无菌的冷熏三文鱼于无菌培养皿中,无菌条件下风干10min去除样品表面水分。将100μL菌体悬浮液(约 $10^8 \sim 10^9$  CFU/mL)接种于样品中,4℃条件下浸染30min。将接菌样品置于破碎机中打碎混匀2min,然后再次人工搅拌混合。取0.2g制备好的样品,用一次性无菌注射器注射至长约80mm玻璃毛细管中(内径为1.8mm,外径3mm),装有样品的毛细管两端热密封,密封端距离样品20mm以避免对微生物产生热影响。热处理前,装有样品的毛细管一直置于冰水中。

#### 1.3.3 染菌三文鱼的热处理

表1 热处理温度、时间及时间间隔

Table 1 Temperature, time and time intervals of heat treatments

温度/℃	时间/s	时间间隔/s
58	1080	270
60	528	132
62	240	60
64	120	30
66	60	15

将玻璃毛细管密封处理好的样品置于恒温循环水浴中,58℃、60℃、62℃、64℃和66℃条件下<sup>[15]</sup>热处理。在测试温度范围内,样品升温时间(加热至设定温度 $\pm 0.5$ ℃)约为14s,此时为热处理的起始时间即 $t=0$ min。加热时间从60~1080s不等,温度、时间与时间间隔试验设计见表1。加热时,将密封装有样品的毛

细管完全浸入热水中，并使其在热水中均匀分布，按照设计的时间间隔，定时取出样品进行测定。热处理后的样品立即放入冰水中以阻止继续失活。从设定温度冷却至室温（20℃），时间大约2 s。每个处理重复3次。

### 1.3.4 菌落数的计算

取出热处理后的毛细管，用体积分数为75%乙醇消毒，无菌条件下用锉刀切开两端，加入2 mL的质量分数为0.1%无菌蛋白胨水移入离心管，通过涡旋振荡器充分振荡溶解，制备成10倍梯度的稀释液。选取3个合适的稀释度，吸取0.1 mL稀释液均匀涂布在TSA培养基表面，倒扣培养皿，放至37℃培养箱培养，48 h后统计单增李斯特菌菌落的数目。所有数据重复3次，算出平均值并转换成log(CFU/g)。

## 1.4 冷熏三文鱼片热处理及品质测定

### 1.4.1 冷熏三文鱼片热处理

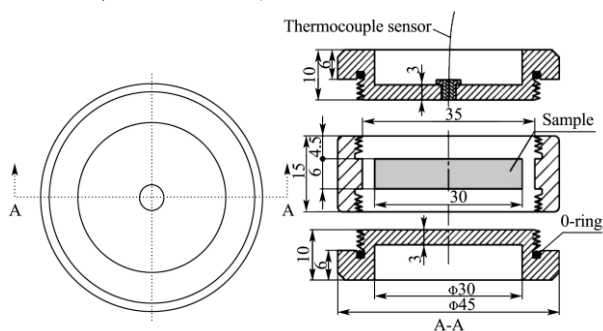


图1 用于品质热动力试验的加热单元示意图

Fig.1 Schematic diagram of TKT (thermal kinetics test) cell for the thermal quality kinetic experiment

表2 用于品质动力学的热处理温度与时间

Table 2 Time and temperature of heat treatment for the thermal quality kinetic experiment

温度/℃	加热时间/min							
50	0	2	10	20	30	60	90	120
57	0	2	5	10	20	30	60	90
64	0	2	5	10	15	20	30	60
70	0	2	5	10	15	20	30	40

取颜色均一的鱼背肉，切成直径30 mm×高6 mm的鱼块，称重（约6.5 g±0.5 g）后密封于高传导率铝合金材料6061（180 W/(m K)制成的密封加热单元（直径35 mm×高6 mm）内<sup>[16]</sup>。实验前，装有样品的密封单元一直置于冰水中。热处理时，装有样品的密封单元完全浸没于恒温循环水浴锅中，50℃、57℃、64℃和70℃条件下<sup>[17]</sup>热处理，加热时间为40~120 min。热处理试验设计见表2。按照试验的时间间隔，定时取出样品进行测定。热处理后的样品立即放入冰水中阻止品质继续

损失。将降温后的样品用滤纸滤干，并用分析天平称量后于4℃条件下冷藏，以便进行后续分析。每个处理重复6个样品，品质指标取其平均值。图1为该加热单元的示意图，该加热单元主要由上、中、下3部分端部带有螺纹的盖子组成，中部直径为Φ35 mm，其中上、下盖边缘附有O-型橡胶圈，能起到良好的密封作用；上盖中心插有一根直径0.1 mm的T型热电偶以连接数据采集器，用于记录加热过程中样品几何中心处温度随时间的变化。热电偶探头用水银温度计校准。热电偶探头设定温度的精度为±0.5℃，感应时间为0.5 s。样品达到设定温度（±1℃）需要的升温时间约为2 min。

### 1.4.2 热处理冷熏三文鱼的品质测定

对热处理的样品，分别测定其加热失重率、色泽（L\*、a\*、b\*）和剪切力，研究不同温度和时间组合下三文鱼品质变化规律和动力学参数<sup>[16]</sup>。

#### 1.4.2.1 加热失重率测定

加热前用滤纸吸干鱼肉表面的水分，迅速用分析天平精确称量。同样，水浴加热处理后，将样品置于冰水混合物中冷却，滤纸拭干表面水分，称重。加热失重率计算公式如下：

$$y = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100\% \quad (1)$$

注：y表示加热失重率/%，A<sub>0</sub>表示加热处理前试样的质量/g，A<sub>t</sub>表示加热处理后试样的质量/g。

#### 1.4.2.2 色泽的测定

采用CIE的L\*、a\*、b\*法测定鱼肉色泽。通过计算机视觉系统获得鱼肉样品的彩色图片，然后通过Adobe Photoshop CS2(8.0版，Adobe Systems Inc., San Jose, CA, USA)图像处理软件分析热处理前后冷熏三文鱼色泽参数L\*（亮度值）、a\*（红绿值）和b\*（黄蓝值）<sup>[16]</sup>。

#### 1.4.2.3 剪切力

采用英国SMS(Stable Micro Systems)公司TA-XT2i型质构仪测定剪切值。选用5-blade Kramer shear-press cell探头，测定模式剪切力，测定前后速度均为10.0 mm/s，测中速度为1.0 mm/s，测定距离为15.0 mm，负重探头类型Auto-25 kg，测定时确保剪切刀前进方向与顺肌纤维方向垂直。

## 1.5 数据分析

### 1.5.1 动力学模型

在食品加工过程中，大多数食品品质变化遵循零级或者一级动力学反应，反应级数不同，品质变化的函数表达式也不同。n=0、1，其函数表达式如方程(2)、(3)所示。

零级反应：



$$C_t = C_0 - k \cdot t \quad (2)$$

一级反应:

$$C_t = C_0 e^{-kt} \quad (3)$$

注:  $C_0$  为食品的初始品质指标值;  $C_t$  为处理后食品品质指标值;  $k$  为反应速率常数 ( $\text{min}^{-1}$ ), 其数值直接反映了反应的快慢。

转换分数模型是一级动力学模型的特殊形式。该模型中反应物含量由初始值转变至剩余值后, 将随反应时间延长保持稳定即非零平衡状态, 一般采用一级动力学模型和转化分数理论同阐述反应的变化规律, 转化分数  $f$  用来描述某反应进行的程度, 其函数表达式如下:

$$f = \frac{C_0 - C_t}{C_0 - C_\infty} \quad (4)$$

对于一级动力学反应, 在半对数坐标中将  $(1-f)$  对时间  $t$  作图, 则有:

$$\ln(1-f) = \ln \frac{C_t - C_\infty}{C_0 - C_\infty} = -kt \quad (5)$$

注:  $C_\infty$  为  $t \rightarrow \infty$  品质指标含量达到非零平衡值。

### 1.5.2 D值和Z值

D值表示指数递减时间 ( $\text{min}$ ), 即在设定温度下品质或微生物数变化90%所需要的时间, 属于逆反应速率常数。在食品工业中, 一级反应动力学模型有广泛的应用, 微生物的死亡, 形式如下:

$$\frac{dN}{dt} = -kN \quad (6)$$

注:  $N$  ( $\text{CFU/g}$ ) 代表微生物活菌数,  $t$  为等温热处理时间 ( $\text{min}$ ),  $k$  ( $\text{min}^{-1}$ ) 微生物死亡速率常数。公式(6)进一步转化, 可以表示为活菌细胞数量对数值与加热时间的线性关系如公式(7)。

$$\log N = \log N_0 - \frac{t}{D} \quad (7)$$

D值越大, 表示该菌或者该品质指标的耐热性越强。将D-value与温度 $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ )在半对数坐标中的关系图称为D-value曲线, 该曲线中D-值降低90%即减少一个对数周期时温度的增加值称为z-值。其函数式可以表示为:

$$z = \frac{T_2 - T_1}{\log D_1 - \log D_2} \quad (8)$$

注:  $T$  为绝对温度 ( $\text{K}$ ),  $D_1$  与  $D_2$  表示  $T_1$  和  $T_2$  温度下的D值, 且  $T_1 < T_2$ 。z 为温度的敏感性指标。

### 1.5.3 活化能

活化能用  $E_a$  表示, 指的是温度对反应速率  $k$  的影

响大小。 $E_a$  较大时, 温度升高  $k$  值增加显著, 即活化能越大, 反应速率  $k$  对温度的变化越敏感。反应速率  $k$  随温度  $T(\text{K})$ 变化的定量关系式用 Arrhenius 方程描述:

$$\ln K = \ln K_0 - \frac{E_a}{RT} \quad (9)$$

注:  $K_0$ -指前因子, 又称频率因子;  $E_a$ -活化能,  $\text{J/mol}$ ;  $R$ -通用气体常数,  $8.314 \text{ J/(mol K)}$ ,  $T$  为绝对温度( $\text{K}$ )。

由方程(9)可知  $\ln k$  与  $1/T$  间存在直线关系, 其斜率

$\frac{d \ln k}{d 1/T} = -E_a/R$ , 截距为  $\ln k_0$ , 即可求得反应的  $E_a$  值和  $K_0$  值。

## 2 结果与分析

### 2.1 单增李斯特菌的热灭活动力学

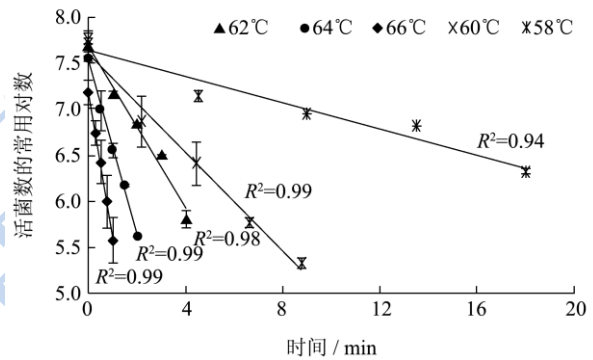


图2 单核细胞增生李斯特菌 ATCC19113 在 5 个温度热处理三文鱼中活菌数曲线

Fig.2 Curves of viable bacterial cell count for *L. monocytogenes* ATCC19113 in cold smoked salmon heated at five different temperatures

不同测试温度条件下单增李斯特菌 ATCC19113 的热失活曲线如图2所示: 存活菌数量的对数值随着加热时间的延长而降低; 菌体的死亡速率随着温度的升高而加快, 温度越高, 杀菌所需时间越短。本研究中采用玻璃毛细管进行热处理, 样品量少, 升温 and 降温阶段时间短, 没有出现“肩效应”。结果显示, 单增李斯特菌 ATCC19113 在冷熏三文鱼中的热失活曲线为线性关系, 这与 Lihan Huang 的研究类似<sup>[18]</sup>。目标菌体的热失活规律更符合一级动力学方程, 测定温度条件下的相关系数 ( $R^2$ ) 均大于 0.94。在  $58^{\circ}\text{C}$ 、 $60^{\circ}\text{C}$ 、 $62^{\circ}\text{C}$ 、 $64^{\circ}\text{C}$  和  $66^{\circ}\text{C}$  条件下的耐热 D 值分别为 14.16、3.76、2.27、1.06 和 0.64 min, z 值为  $6.17^{\circ}\text{C}$ 。该结果与 Mazzotta 关于人造蟹肉糜中单增李斯特菌杀灭研究结果相似, 其耐热参数  $D_{62}=2.1 \text{ min}$ ,  $D_{66}=0.4 \text{ min}$ ,  $z=5.8^{\circ}\text{C}$ <sup>[19]</sup>。通过 Arrhenius 方程(9)求得到在  $58\sim 66^{\circ}\text{C}$  温度范围内, 对于单增李斯特菌 ATCC19113 的热失活活化能为  $349.57$

kJ/mol。该值位于食品常用微生物热失活致死活化能 209~418 kJ/mol范围内<sup>[20]</sup>。

## 2.2 加热失重率的影响

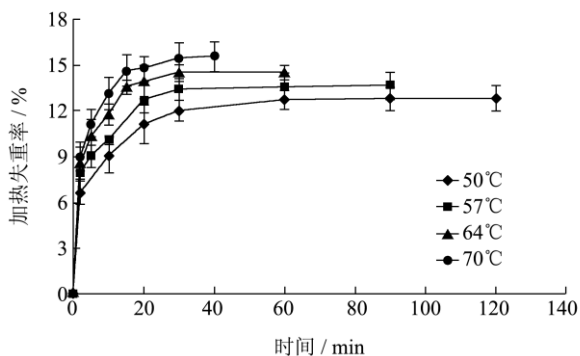


图3 不同温度处理下冷熏三文鱼片加热失重率变化

Fig.3 Changes in the cooking loss of cold smoked salmon fillet heated at four different temperatures

肉在加热过程中，加热失重率主要是由于肌肉的结构蛋白肌原纤维中的肌浆蛋白、胶原蛋白变性及热收缩，使蛋白质的持水性减弱，将游离水及肌浆蛋白分子受热降解的多肽、氨基酸和小分子释放出来。随着加热温度升高，肌球蛋白变性加剧，时间的推移蛋白质完全变性，加热失重率变化非常小最终达到恒定值。冷熏三文鱼热处理加热失重率如图3所示：在水浴加热过程中，随着温度的升高，鱼肉的加热失重率不断增加；随着加热时间的推移，加热失重率在20 min内增加较快，之后随着加热时间的延长，加热失重率增加趋势减缓并最终达到一个非零恒定值。在50 °C、57 °C、64 °C和70 °C条件下。恒定值分别为12.83%、13.63%、14.50%和15.54%。加热失重率恒定值与温度线性回归方程如下式所示：

$$CL_{\infty} = 0.1339T + 6.0599 \quad R^2 = 0.99 \quad (10)$$

加热失重率增加较快阶段即曲线较陡阶段的反应速率k随温度T(K)变化的定量关系式可以通过阿伦尼乌斯方式(公式9)来表达。表3中列出四个温度下反应速率，活化能Ea和频率因子k<sub>0</sub>及相关系数。活化能为26.83 kJ/mol，与报道在温度65~95 °C热处理蓝贻贝加热失重率活化能55.6 kJ/mol在同一范围内<sup>[19]</sup>，频率因子k<sub>0</sub>为450.16/min，将所得值代入公式9，Arrhenius方程变为：

$$k = 450.2 \times \frac{26.83 \times 1000}{e^{8.314 \times (273+T)}} \quad (11)$$

将公式(5)转化为公式(12)，加热失重率即为：

$$CL_t = (1 - e^{-kt}) \cdot CL_{\infty} \quad (12)$$

表3 冷熏三文鱼片在四个温度热处理加热失重率一级动力学模型参数

Table 3 First-order kinetic parameters for the cooking loss of cold smoked salmon fillets heated at four different temperatures

温度 / °C	k × 10 <sup>-3</sup> / min	R <sup>2</sup>	D <sub>T</sub> 值 / min	Ea / (kJ/mol)	k <sub>0</sub> / min	R <sup>2</sup>	Z / °C
50	20.6	0.91	111.80	26.83	450.16	0.97	79.37
57	25.2	0.99	83.75				
64	33.5	0.96	70.43				
70	35.7	0.94	64.87				

## 2.3 色值的影响

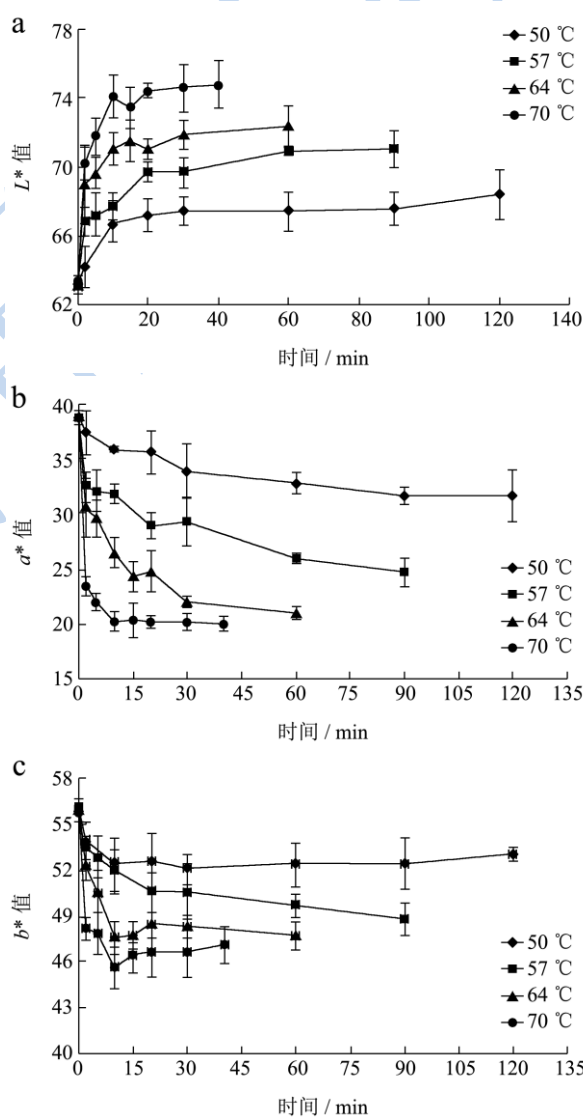


图4 不同温度热处理冷熏三文鱼片色值L\*、a\*和b\*的变化

Fig.4 Change in the color values of cold smoked salmon fillet at different heating temperatures: (a) CIE L\*, (b) CIE a\*, (c) CIE b\*

样品加热过程中,随着温度的升高,蛋白组分逐渐变性,色泽发生变化。图4a~图4c显示了温度升高、加热时间延长对鱼肉色泽的影响。如图4所示,温度升高使L\*值显著增加(P<0.05),a\*显著性减小(P<0.05),b\*值呈下降趋势;随着加热时间的延长,L\*值开始增加较快后增加减缓,b\*值呈现先减小后增大趋势,a\*值呈减小的趋势。试验热处理过程大致分为快速变白和慢速褐变两阶段。在快速变白阶段,可能是由于随着温度的升高肌球蛋白变性,鱼的颜色变白,同时由于三文鱼中的血红蛋白和肌红蛋白发生变化,脱氧肌红蛋

白和氧合肌红蛋白逐渐变为褐色。对于褐变阶段,由于热处理温度较温和,褐变的程度较弱,表观颜色改变幅度较小。在实际生产过程中,在满足杀菌要求的前提下,杀菌时间越短,品质指标变化越小。对冷熏三文鱼真空包装后的巴氏杀菌来说,研究变白阶段更有实际意义。在试验变白阶段,L\*值、a\*值、b\*值反应级数及其活化能和动力学相关参数如表3所示。L\*值符合零级动力学规律,a\*值和b\*值符合一级动力学规律。活化能为60~90 kJ/mol。该值位于食品品质损失活化能63~126 kJ/mol范围内<sup>[20]</sup>。

表4 冷熏三文鱼片四个温度热处理色值(L\*、a\*和b\*)变化动力学模型参数

Table 4 Kinetic parameters for color changes of cold smoked salmon fillets after heat treatments at four different temperatures

颜色参数	反应级数	温度/°C	k×10 <sup>-3</sup> /min	R <sup>2</sup>	D <sub>T</sub> 值/min	Ea/(kJ/mol)	k <sub>0</sub> /min	R <sup>2</sup>	z/°C
CIE L*	0	50	1.65	0.73	1394.91	57.10	2.73×10 <sup>6</sup>	0.99	37.04
		57	2.39	0.98	964.41				
		64	3.71	0.99	621.42				
		70	5.73	0.99	402.27				
CIE a*	1	50	3.21	0.93	716.78	88.04	5.97×10 <sup>11</sup>	0.93	24.15
		57	6.48	0.89	355.40				
		64	18.2	0.99	126.41				
		70	18.8	0.99	122.78				
CIE b*	1	50	1.09	0.69	2112.84	81.65	2.04×10 <sup>10</sup>	0.95	26.04
		57	3.14	0.99	733.91				
		64	4.27	0.86	539.00				
		70	7.04	0.92	327.36				

2.4 剪切力的影响

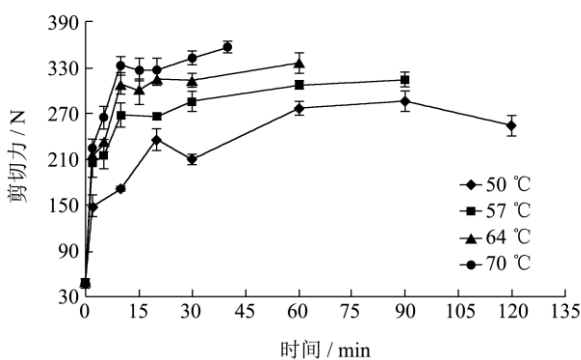


图5 不同温度热处理冷熏三文鱼片剪切力的变化

Fig.5 Changes in the shear force of cold smoked salmon treated at different heating temperatures

温度变化对剪切力的影响如图4所示:随着温度升高,剪切力明显增大。同一温度下,随着处理时间的延长,剪切力先快速增长至最高点,之后稍有下降后又缓慢增加,这与戚彪等<sup>[22]</sup>研究猪肝在热作用过程中的剪切力的变化结果相似,这可能是鱼肉经过加热后,组织收缩,含水量下降,导致硬度明显增加,但受热

后鱼肉不会持续变硬,经过一定的温度和时间处理后,由于胶原蛋白部分溶解成明胶而使其软化,硬度下降。随着热处理时间的延长,大多数蛋白质已完全变性,鱼肉中水分流失加剧,从而导致肌纤维进一步收缩变硬,所以硬度又轻微增大趋势。快速变硬阶段品质变化较快,此阶段在实际杀菌中更具有实际意义。通过数据分析,此阶段符合一级反应动力学模型,相关系数为R<sup>2</sup>≥0.94。反应速率、活化能及相关系数见表5。活化能为30.53 kJ/mol,远低于蛋白质变性的活化能200~600 kJ/mol<sup>[23]</sup>。因此,该阶段剪切力的变化主要由脱水、聚合及结构破坏引起,而不是蛋白质变性作用。

2.5 动力学模型应用

动力学模型在生产实践中一个很重要的应用就是控制工艺参数并获得最佳热处理条件。控制作用的理论基础是食品中微生物及品质指标动力学参数大小不同,即它们对温度的敏感性不同,优化热处理的温度-时间组合,从而在杀菌的同时尽量降低食品的品质损失。一般来说,对于高含水分的食品,产品的指标耐热值(D值)远大于微生物的耐热值(D值)。在同

样的热处理条件下,耐热值之间的较大差异使灭菌的同时保证了产品的品质。

表5 冷熏三文鱼片在四个温度下热处理剪切力一级动力学模型参数

Table 5 First-order kinetic parameters for the shear force of cold smoked salmon fillets after heat treatments at four different temperatures

温度 / °C	$k \times 10^{-3}$ / min	$R^2$	$D_T$ 值 / min	$E_a$ / (kJ/mol)	$k_0$ / min	$R^2$	$z$ / °C
50	25.8	0.98	89.10	30.53	$2.31 \times 10^3$	0.95	69.44
57	34.2	0.94	67.38				
64	46.6	0.96	49.40				
70	48.4	0.99	47.55				

根据对冷熏三文鱼中温热处理品质指标加热失重率、色值 ( $L^*$ 、 $a^*$ 和 $b^*$ ) 及剪切力动力学结果分析可知,色值 $a^*$ 的活化能最高,从理论上说该指标对温度最敏感。结合单增李斯特菌的热失活动力学模型,图6直观的反映了李斯特菌ATCC19113与品质指标 $a^*$ 对温度敏感性的差异。色值 $a^*$ 质量劣变曲线与单增李斯特菌ATCC19113死亡曲线重叠区域为最佳的加热温度与时间组合,可同时满足杀菌及品质保持要求。这种涉及不同反应动力学规律的综合研究,对优化热处理工艺具有重要的指导意义。

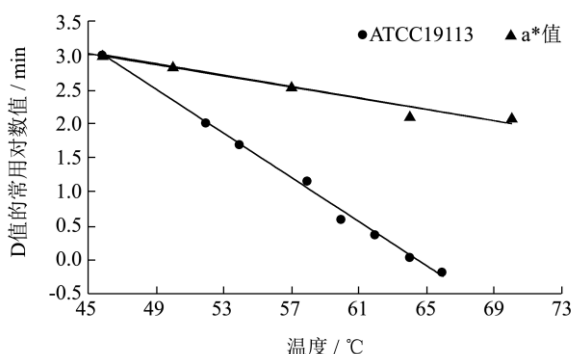


图6 单增李斯特菌ATCC19113热死亡曲线和品质指标 $a^*$ 值的劣变曲线

Fig.6 Thermal-death-time curve and  $a^*$  quality deterioration curve of *Listeria monocytogenes* ATCC19113

### 3 结论

3.1 在温度 58 °C~66 °C热处理条件下,采用玻璃毛细试管水浴加热,测定冷熏三文鱼中单增李斯特菌(ATCC19113)的失活曲线,结果表明该曲线符合一级动力学方程,相关系数均大于 0.94, D 值由 14.16 min 急剧减小至 0.64 min; z 值和活化能分别为 6.17 °C 和 349.57 kJ/mol。

3.2 采用铝制加热单元研究冷熏三文鱼中温水浴加热

过程中加热失重率、色值 ( $L^*$ 、 $a^*$ 和 $b^*$ ) 及剪切力的变化。结果表明,加热失重率遵循一级动力学模型,大部分失重出现在加热初始的 20 min 内;加热处理导致鱼肉颜色变白,剪切力增大; $a^*$ 值、 $b^*$ 值及剪切力遵循一级反应动力学规律, $L^*$ 值遵循零级反应动力学规律。

3.3 根据本研究单增李斯特菌热失活和冷熏三文鱼品质变化动力学模型可知,冷熏三文鱼色值  $a^*$ 变化与李斯特菌热灭菌密切相关,色值  $a^*$ 质量劣变曲线与李斯特菌 ATCC19113 死亡曲线重叠区域为最佳的热处理温度与时间组合,可同时满足杀菌及品质保持要求。

### 参考文献

- [1] NMFS (National Marine Fisheries Service). 2011. Report on the Status of U.S. Fisheries for 2010. Silver Spring, MD, www.nmfs.noaa.gov
- [2] Tocmo R, Krizman K, Khoo W, et al. *Listeria monocytogenes* in vacuum-packed smoke fish products: occurrence, routes of contamination, and potential intervention measures [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2014, 13(2): 172-189
- [3] Lorentzen G, Olsen R L, Bjorkevoll I, et al. Survival of *Listeria innocua* and *Listeria monocytogenes* in muscle of cod (*Gadus morhua* L.) during salt-curing and growth during chilled storage of rehydrated product [J]. Food Control, 2010, 21(3): 292-297
- [4] 于旖斯,侯红漫,张宇,等.七类食品单核细胞增生性增李斯特菌污染状况调查[J].食品工业,2010,1:21-23  
YU Yi-si, HOU Hong-man, ZHANG Yu, et al. Survey of contamination by *Listeria Monocytogenes* in seven kinds of food [J]. Food Industry, 2010,1:21-23
- [5] Lianou A, Sofos J N. A review of the incidence and transmission of *Listeria monocytogenes* in ready-to-eat products in retail and food service environments [J]. Journal of Food Protection, 2007, 70(9): 2172-2198
- [6] Hassani M, Álvarez I, Rasco, et al. Comparing predicting models for heat inactivation of *Listeria monocytogenes* and *Pseudomonas aeruginosa* at different pH [J]. International Journal of Food Microbiology, 2005, 100(1-3): 213-222
- [7] P G Smith. Introduction to food process engineering [M]. Springer US, 2011
- [8] Pina-Pérez M, Belloch-Tinoco M, Rodrigo D, et al.



- Cronobacter sakazakii inactivation by microwave processing [J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(3): 821-828
- [9] Huang Y, Sheng J, Yang F, et al. Effect of enzyme inactivation by microwave and oven heating on preservation quality of green tea [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(2): 687-692
- [10] Valero A, Cejudo M, Garcia-Gimeno R M. Inactivation kinetics for Salmonella Enteritidis in potato omelet using microwave heating treatments [J]. Food Control, 2014, 43: 175-182
- [11] Schlisselberg D B, Kier E, Kalily E, et al. Inactivation of foodborne pathogens in ground beef by cooking with highly controlled radio frequency energy [J]. International Journal of Food Microbiology, 2013, 160(3): 219-226
- [12] Sheen S, Huang L, Sommers C. Survival of *Listeria monocytogenes*, *Escherichia coli O157:H7*, and *Salmonella spp.* on catfish fillets exposed to microwave heating in a continuous mode [J]. Journal of Food Science, 2012, 77(8): E209-E214
- [13] Embarek P K B, Huss H H. Heat resistance of *Listeria monocytogenes* in vacuum packaged pasteurized fish fillets [J]. International Journal of Food Microbiology, 1993, 20(2): 85-95
- [14] Skipnes D, Johnsen SO, Skårå T, et al. Optimization of heat processing of farmed atlantic cod (*gadus morhua*) muscle with respect to cook loss, water holding capacity, color, and texture [J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2011, 20(3): 331-340
- [15] Peng J, Mah J H, Somavat R, et al. Thermal inactivation kinetics of bacillus coagulans spores in tomato juice [J]. Journal of Food Protection, 2012, 75(7): 1236-1242
- [16] Kong F, Tang J, Rasco B, et al. Quality changes of salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) muscle during thermal processing [J]. Journal of Food Science, 2007, 72(2): S103-S111
- [17] 冯晓慧,王庆国,王仁欢,等.牛肉中但增李斯特菌的热失活模型[J].微生物学报,2009,51(5):684-691  
FENG Xiao-hui, WANG Qing-guo, WANG Ren-huan, et al. Thermal inactivation model of *Listeria monocytogenes* in ground beef [J]. Acta Microbiologica Sinica, 2009, 51(5): 684-691
- [18] Lihan H. Determination of thermal inactivation kinetics of *Listeria monocytogenes* in chicken meats by isothermal and dynamic methods [J]. Food Control, 2013, 33: 484-488
- [19] Mazzotta A S. Thermal inactivation of stationary-phase and salt-adapted *Listeria monocytogenes* during postprocess pasteurization of surimi-based imitation crab meat [J]. Journal of Food Protection, 2001, 64(4): 483-485
- [20] Nelson P E. Principles of aseptic processing and packaging [M]. Purdue University Press, 2010
- [21] Ovissipour M, Rasco B, Tang J, et al. Kinetics of quality changes in whole blue mussel (*Mytilus edulis*) during pasteurization [J]. Food Research International, 2013, 53(1): 141-148
- [22] 戚彪,曲超,成晓瑜,等.微波杀菌对猪肝品质特性的影响[J].食品科学,2013,34(1):69-72  
QI Biao, QU Chao, CHENG Xiao-yu, et al. Effect of microwave sterilization on quality properties of stewed pork liver [J]. Food Science, 2013, 34(1): 69-72
- [23] Bertola N, Bevilacqua A, Zaritzky N. Heat treatment effect on texture changes and thermal denaturation of proteins in beef muscle [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 1994, 18(1): 31-46