

# 腌制三文鱼高温蒸烹饪过程中的减盐效果分析

成军虎<sup>1\*</sup>, 廉凤丽<sup>1</sup>, 余旭聪<sup>1</sup>, 孙大文<sup>1</sup>, 于华宁<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510640)

(2. 广东美的厨房电器制造有限公司, 广东佛山 528311)

**摘要:** 减少食盐摄入量已成为人们对健康饮食的一个共识。高温蒸是一种新式的烹饪手段, 得到越来越广泛的应用。该研究对腌制三文鱼高温蒸烹饪过程中减盐规律进行研究, 建立减盐模型, 并通过 SEM 对三文鱼微观结构进行观察。研究结果表明, 在烹饪过程中, 蒸煮损失的增加是氯化物总含量减少的主要因素。通过对  $\ln[-\ln(1-P)]$  与  $\ln t$  进行线性拟合, 发现在 180 °C~220 °C 范围内, 不加蒸汽以及加入 6 min 蒸汽, 均符合多孔介质的传质传热数学模型, 此外, 氯化物总量减少百分比  $P$  与加入蒸汽时间符合线性关系。在 220 °C 加热总时间 18 min, 加入 6 min 蒸汽条件下, 腌制三文鱼的氯化物总含量降低达 26.44%。通过 SEM 对三文鱼微观结构进行观察, 结果表明, 随着烹饪温度升高和时间延长, 三文鱼肌纤维间的间隙变小, 排列变紧密, 且肌纤维直径减小, 而加入蒸汽可以加速鱼肉蛋白的变性, 并且在一定程度上减缓烹饪过程中鱼肉肌纤维的收缩, 可降低盐分在鱼肉中的传质阻力, 使盐分更容易被脱除。

**关键词:** 高温蒸; 氯化物总量减少百分比; 模型; 微观结构

文章编号: 1673-9078(2022)10-198-204

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.10.1390

## Salt-reducing Effects of High-temperature Steaming on Pickled Salmon

CHENG Junhu<sup>1\*</sup>, LIAN Fengli<sup>1</sup>, YU Xucong<sup>1</sup>, SUN Dawen<sup>1</sup>, YU Huaning<sup>2</sup>

(1. School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

(2. Guangdong Midea Kitchen Appliances Manufacturing Co. Ltd., Foshan 528311, China)

**Abstract:** Reducing salt intake has become a commonly agreed upon key step in achieving a healthy diet. High-temperature steaming is a novel cooking method that is becoming more and more widely used. Cooking loss due to high temperature steaming was determined, and the ratio by which high temperature steaming reduced chloride levels in pickled salmon relative to cooking loss was calculated. A model was then established to simulate cooking loss-mediated salt reduction. Changes in salmon microstructure were also observed by SEM. These results demonstrate that cooking loss increases as cooking temperature and time increase. Moreover, cooking loss is the main factor affecting total chloride content reduction in the cooking process. For both cooking without steaming and cooking with steaming for 6 min, in the range of 180 °C to 220 °C, the  $\ln[-\ln(1-P)]$ - $\ln t$  linear fitting results are consistent with a mathematical model of mass and heat transfer of porous media. Meanwhile, the salt reduction rate shows a good linear relationship with steaming time. When pickled salmon is heated at 220 °C for 18 min and steamed for 6 min, total chloride reduction reaches 26.44%. The SEM micrographs show that, as cooking temperature and time increase, the gaps between fibers decrease. At the same time, myointimal tissue is gradually destroyed, and fiber diameters decrease. Adding as teaming step can also accelerate the denaturation of fish proteins. To some extent, it slows down fiber contraction and decreases the mass transfer resistance of salt, making it easier to remove the salt.

**Key words:** high-temperature steaming; reduction ratio of total chloride; model; microstructure

引文格式:

成军虎, 廉凤丽, 余旭聪, 等. 腌制三文鱼高温蒸烹饪过程中的减盐效果分析[J]. 现代食品科技, 2022, 38(10): 198-204

CHENG Junhu, LIAN Fengli, YU Xucong, et al. Salt-reducing effects of high-temperature steaming on pickled salmon [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(10): 198-204

氯化钠在人体代谢中起着不可或缺的作用, 然而,

收稿日期: 2021-12-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31972205); 厨房电器健康烹饪技术创新联盟(2021029)

作者简介: 成军虎(1983-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品非热加工与食品安全检测技术, E-mail: fecheng.jh@scut.edu.cn

目前的许多研究认为, 盐的过量摄入会给健康带来危害, 如引发高血压、脑卒中等心脑血管疾病, 以及增加患胃癌的几率、诱发骨质疏松并增加肾脏负担进而引起损伤等。我国 2016 年发布的《中国居民膳食指南》, 提出了少盐少油的饮食建议<sup>[1]</sup>。2017 年, 国家卫生计生委提出了“三减三健”的健康生活方式, 即减

盐、减油、减糖,健康口腔、健康体重、健康骨骼,其中,建议成人每人每天食盐摄入量不超过6 g, 2~3岁幼儿摄入量不超过2 g, 4~6岁幼儿不超过3 g, 7~10岁儿童不超过4 g, 65岁以上老人不超过5 g<sup>[2]</sup>。2019年8月,国家卫生健康委官网正式发布“中国居民减盐核心信息十条”,其中指出,目前我国居民食盐平均摄入量为10.5 g,而全球每年300万人因高盐饮食死亡,并提出建议,健康成人应养成每天食盐不超过6 g<sup>[3]</sup>。目前,我国居民食盐平均摄入量已超过建议摄入量标准,减少食盐摄入被认为是对心脑血管疾病最简单有效的预防方法。

食盐腌制是海鱼保鲜最简单而常用的方式,此外,新鲜鱼类在烹饪前,常常也放入食盐进行数小时腌制以增加其鲜味。高温蒸汽技术已在农产品的干燥或热烫上得到应用<sup>[4,5]</sup>,而其作为一种新式的烹饪手段,被认为具有缩短加热时间、提高出成率、脱脂、减盐<sup>[6]</sup>以及保留不饱和脂肪酸和其他营养成分<sup>[7,8]</sup>、提高食品品质<sup>[9,10]</sup>等优点,被越来越广泛应用于现代餐饮服务及家庭烹饪中<sup>[11,12]</sup>。Kim等<sup>[13]</sup>比较了不同预煮方法对加热腌制猪里脊质量的影响,结果表明,相比于煮、烧烤、煎炸、红外烹饪,过热蒸汽预煮有助于改善腌制猪肉的品质。陈新欣等<sup>[14]</sup>研究了过热蒸汽在腊肉方便菜肴中的应用,结果表明,过热蒸汽烹饪可降低干豆角和腊肉中的食盐含量。在高温蒸烹饪过程中,盐分在鱼肉中的传质扩散以及脱除规律和机制尚未清晰。本文将对高温蒸烹饪过程中腌制三文鱼中氯化物含量和总量的变化,以及减盐的机制进行研究和探讨。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

蓝雪牌三文鱼排,购于广州沃尔玛超市;高温蒸设备(试产样机),编号201907270011,由广东美的厨房电器制造有限公司提供;PROVA 800型多通道热电偶测温仪,台湾宝华公司;SB25-12D型超声波清洗机,宁波新艺超声设备有限公司。

### 1.2 样品处理

将三文鱼排(厚度约1.5 cm)去骨去皮,切成重量为(100±1) g块状,加入1.00 g食盐,正反两面抹匀,放入4℃冰箱中腌制12 h后,进行高温蒸烹饪。烹饪前,先将炉腔温度预热至试验烹饪温度,迅速将三文鱼排放入炉腔内,开始计时,至计时结束后取出。通过预实验得到三文鱼在不同温度条件下合适的烹饪时间分别为:160℃加热16~24 min,180℃加热

14~22 min,200℃加热12~20 min,220℃加热10~18 min,三文鱼排已完全完全熟透且没有出现明显焦糊,后续采用此烹饪条件进行试验。采用蒸汽加热时,预热时将蒸汽和加热开关同时打开,待放入三文鱼排后,开始计时,加入蒸汽时间为2~8 min,蒸汽计时结束后关闭蒸汽(继续加热处理,待加热计时结束后取出)。

## 1.3 试验方法

### 1.3.1 蒸煮损失

参考Zuo等<sup>[15]</sup>的方法,对未经处理的样品称重,记重量为 $m_1$ ,待样品处理完成后,立即取出,用吸水纸吸干肉块表面汁液,称重记为 $m_2$ ,计算蒸煮损失。蒸煮损失按式(1)计算。

$$M = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

$M$ ——蒸煮损失, %;

$m_1$ ——样品处理前的重量, g;

$m_2$ ——样品处理后的重量, g。

### 1.3.2 氯化物含量测定

参照国标《GB 5009.44-2016 食品安全国家标准食品中氯化物的测定》中的银量法(摩尔法或直接滴定法)进行测定<sup>[16]</sup>。

氯化物总量减少百分比,即烹饪前后三文鱼排中氯化物总量减少的百分比,可通过式(2)计算。

$$P = \frac{m_1 \times c_1 - m_2 \times c_2}{m_1 \times c_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

$P$ ——氯化物总量减少百分比, %;

$c_1$ ——样品处理前的氯化物含量, g/100 g;

$c_2$ ——样品处理后的氯化物含量, g/100 g。

将式(1)代入式(2),得到式(3)。

$$1 - P = (1 - M) \times \frac{c_2}{c_1} \quad (3)$$

### 1.3.3 扫描电镜分析

参考Wattanachant等<sup>[17]</sup>的方法,将制备好的样品切成0.5 cm×1.0 cm×0.5 cm的长方体,在2.5%戊二醛溶液中于4℃条件下固定12 h以上。用0.1 mol/L、pH值7.2的磷酸盐缓冲液清洗3次,每次40 min(置于4℃),用乙醇溶液(体积分数)逐级(30%、50%、70%)(置于4℃)、80%、90%脱水,每级脱水20 min,100%乙醇5次,每次10 min,用醋酸异戊脂脱水3次,每次10 min。将样品进行冷冻干燥,切成薄片,黏台,离子溅射仪喷金,SEM观察、拍照。照片采用

Image J软件随机选择15个肌纤维测量其长径和短径,取平均值。

### 1.3.4 数据分析

采用软件 Excel 2007 和 Origin 8.0 对数据进行处理和分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 高温蒸对腌制三文鱼蒸煮损失的影响

图1为不同温度条件下不加蒸汽以及加入6 min蒸汽对三文鱼蒸煮损失的影响。从图中可以看出,随着温度升高和加热时间延长,蒸煮损失增大。有研究表明,在烹饪过程中,肌肉中胶原纤维热收缩迫使肌纤维细胞中已发生严重变性的肌浆蛋白随自由水分大量溶出,以及肌球蛋白和肌动蛋白的剧烈变性和可溶性胶原蛋白形成明胶溶出是导致烹饪损失增加的主要原因<sup>[18,19]</sup>。图1的结果还表明,与不加蒸汽相比,加入6 min蒸汽使得蒸煮损失有所增大,说明,在烹饪初期加入热蒸汽增强了鱼肉的传热作用,加速了鱼肉的熟化,而熟化过程伴随着鱼肉蛋白的变性,使其对水分子的结合能力下降,使得蒸煮损失增加。通过对比不同温度条件下的蒸煮损失,可以发现,160和180℃条件下加入6 min蒸汽,对蒸煮损失的影响较大,而在200和220℃条件下,加入蒸汽对蒸煮损失的影响较小,这可能是由于,在较高温度烹饪条件下,鱼肉内外温度梯度更大,传热推动力也更大,加入热蒸汽对传热的增强作用则相对较小,而在较低的烹饪温度条件下,加入蒸汽对传热的增强作用则更明显。

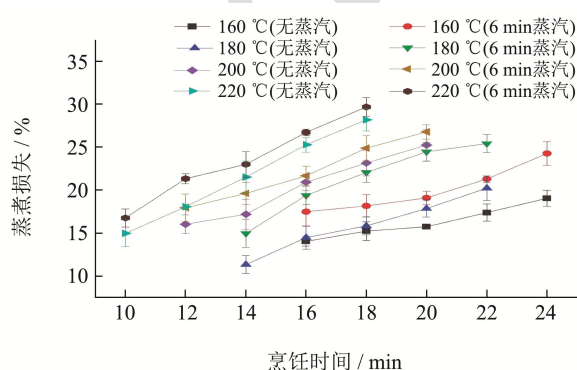


图1 不同高温蒸条件对腌制三文鱼蒸煮损失的影响

Fig.1 Effects of different cooking conditions on cooking loss of pickled salmon

### 2.2 高温蒸对腌制三文鱼氯化物含量和氯化物总量减少百分比的影响

不同温度条件下,无蒸汽与加入6 min蒸汽对腌

制三文鱼氯化物含量的影响见图2,通过计算得到氯化物总量减少百分比见图3。从图2可以看出,随着烹饪温度的升高以及时间的延长,鱼肉中的氯化物含量略有增加。实验结果表明,总体上,加入蒸汽可在一定程度降低鱼肉中氯化物的含量,在180℃条件下加入6 min蒸汽对氯化物含量影响较小。

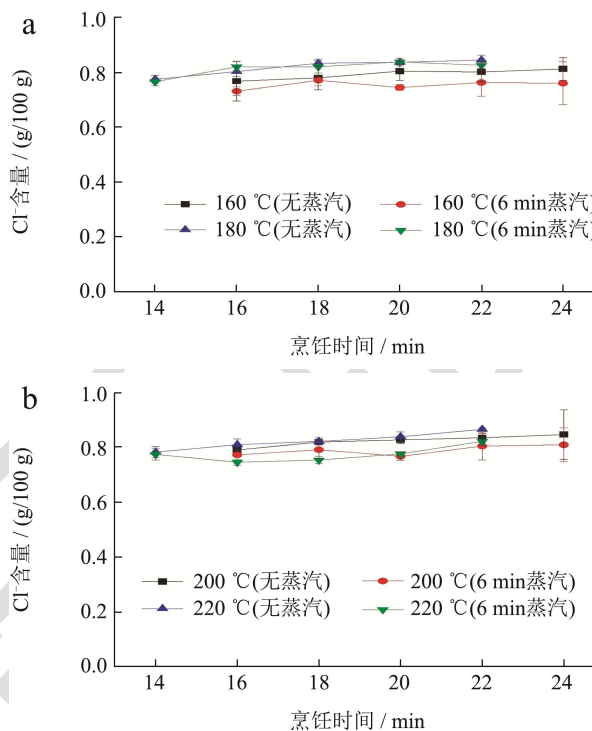


图2 不同高温蒸条件对腌制三文鱼氯化物含量的影响

Fig.2 Effects of different cooking conditions on chloride content of pickled salmon

注: a为160℃和180℃不加蒸汽及加入6 min蒸汽, b为200℃和220℃不加蒸汽及加入6 min蒸汽。

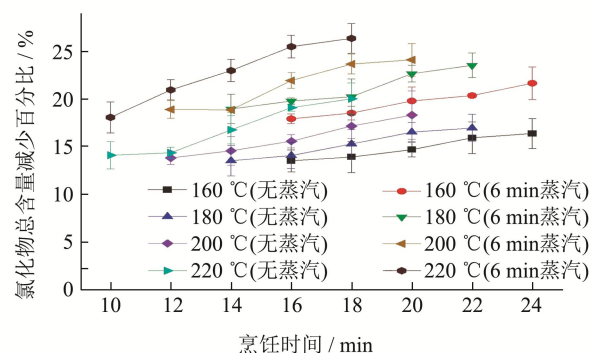


图3 不同高温蒸条件对腌制三文鱼氯化物总量减少百分比的影响

Fig.3 Effects of different cooking conditions on reduction ratio of total chloride of pickled salmon

而从图3可以看出,升高烹饪温度、延长烹饪时间、加入蒸汽均可降低氯化物总含量。在220℃无蒸汽条件下,随着烹饪时间的延长,P值从加热10 min

时的 14.12% 提高至加热 18 min 时的 20.07%，而加入 6 min 蒸汽条件下，加热 10 min 和 18 min 时的  $P$  值分别为 18.11% 和 26.44%。由式 (3) 可知， $(1-P)$  与  $(1-M)$  以及  $c_2/c_1$  成正比例关系，烹饪后  $P$  值的变化，一方面是由烹饪后鱼肉重量  $m_2$  较未烹饪时的重量  $m_1$  减小所引起的，另一方面，是由烹饪后鱼肉中氯化物含量  $c_2$  的变化引起的，这两方面因素均与烹饪温度、烹饪时间以及是否加入蒸汽相关。而通过对比图 1 和图 2 结果可发现，在不同烹饪条件下， $(1-M)$  变化幅度较大，而  $c_2/c_1$  变化幅度相对较小，由此可知，烹饪过程中蒸煮损失的增加是  $P$  值增大的主要因素。

### 2.3 腌制三文鱼高温蒸烹饪过程减盐规律模型的探讨

由于氯化钠极易溶于水，在不加入蒸汽的高温烹饪条件下，鱼肉中蛋白质受热变性，对水分子的束缚能力下降，产生的自由水携带着鱼肉中的盐分流出，从而起到减盐的作用。由此可推断，在无蒸汽条件下，高温烹饪过程中  $P$  值的提高与鱼肉中水分的流失有直接的关联，因此，减盐过程也可用脱水模型来进行解析。Nathamol 等<sup>[20]</sup>建立了过热蒸汽烘烤和热风处理罗布斯塔咖啡豆过程中，水分含量和加热时间的关系模型，该模型具有良好的预测性。骆晓敏<sup>[21]</sup>在鸡肉脱水的研究中认为，鸡肉从结构特性来说属于多孔介质，可以利用多孔介质的传质传热数学模型对水分含量和时间的关系进行表征，该研究结果表明，烘制过程中肉鸡翅根的水分比  $\ln(-\ln MR)$  与时间  $\ln t$  具有良好的线性关系。本研究参照以上模型，以氯化物总量减少百分比  $P$  和烹饪时间  $t_1$  作为参数，分别制作无蒸汽以及加入 6 min 蒸汽条件下， $\ln[-\ln(1-P)]$  与  $\ln t_1$  的关系曲线，结果见图 4，通过线性回归求得关系表达式见表 1。结果表明，在 180~220 °C 条件下不加蒸汽以及加入 6 min 蒸汽， $\ln[-\ln(1-P)]$  与  $\ln t_1$  均具有良好的线性关系。在无

蒸汽条件下， $a$  值在 160~200 °C 条件下变化较小，220 °C 时  $a$  值减小，而在加入 6 min 蒸汽条件下，当温度达到 200 °C 时  $a$  值开始降低，而  $k$  值则随烹饪温度升高而增大，在整体上，温度升高有利于  $P$  值的增大。同时，通过对比加入 6 min 蒸汽与不加蒸汽条件下模型的参数，可以发现，在相同温度条件下，加入 6 min 蒸汽使得  $a$  值增大，而  $k$  值变化不大，总体上有利于  $P$  值的增大。加入蒸汽后  $P$  值的变化，一方面是由于，加入热蒸汽后，鱼肉蒸煮损失增加，盐分随水分流出而被脱除，另一方面，加入蒸汽在鱼肉表面凝结成液态水，起到冲刷作用，带走了鱼肉表面的部分盐分。

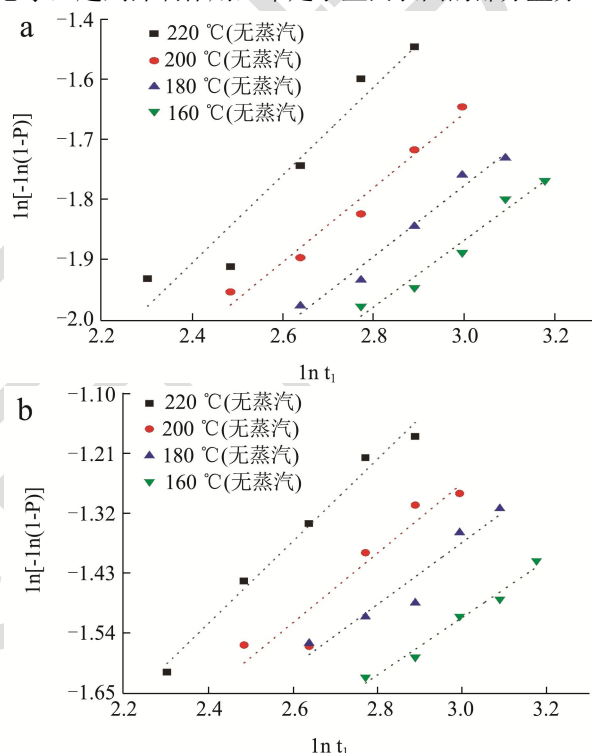


图 4 无蒸汽及加入 6 min 蒸汽条件下氯化物总量减少百分比与烹饪时间的关系模型

Fig.4 Model of reduction ratio of total chloride and cooking time under non-steaming and 6-minute-steaming conditions

注：a 为无蒸汽，b 为加入 6 min 蒸汽。

表 1 无蒸汽及加入 6 min 蒸汽条件下烹饪时间与氯化物总量减少百分比的关系

Table 1 Relationship between cooking time and reduction ratio of total chloride under non-steaming and 6-minute-steaming conditions

蒸汽条件	烹饪温度/°C	关系表达式	$a$	$k$	$R^2$
无蒸汽	160	$P = 100\% - e^{-ax_1^k}$	0.031	0.56	0.96
	180		0.030	0.56	0.97
	200		0.031	0.62	0.97
	220		0.027	0.73	0.94
加入 6 min 蒸汽	160		0.046	0.52	0.98
	180		0.047	0.56	0.93
	200		0.042	0.63	0.90
	220		0.036	0.75	1.00

为进一步探讨加入蒸汽对减盐效果的影响,本文研究了 160~220 °C 温度条件下烹饪 16 min, 加入 0~8 min 蒸汽时间对腌制三文鱼氯化物总量减少百分比的变化, 结果见图 5。从图中可以看出,  $P$  值随加热温度升高而增加, 并且, 在加入蒸汽 0~8 min 范围内, 随着加入蒸汽时间  $t_2$  延长,  $P$  值增加, 两者呈线性关系, 通过线性回归求得关系表达式见表 2。线性拟合结果表明, 在 180 °C 条件下,  $K$  值最大。表达式中  $K$  值表示加入单位时间蒸汽对提高  $P$  值的贡献,  $K$  值越大, 说明在该温度条件下, 增加蒸汽时间  $t_2$  对提高  $P$  值具有更明显的作用。而  $b$  值与加入蒸汽时间  $t_2$  无关, 只与烹饪温度有关, 从表 2 可知,  $b$  值随温度的升高而增大, 表明在不加蒸汽 (加入蒸汽时间为 0 min) 条

件下,  $P$  值随烹饪温度升高而增大。

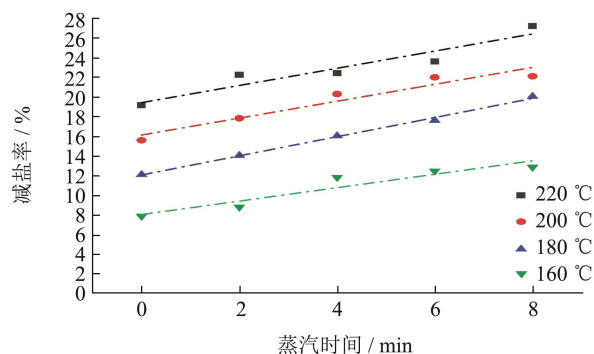


图 5 不同蒸汽时间对腌制三文鱼氯化物总量减少百分比的影响  
Fig.5 Effects of different steaming time on reduction ratio of total chloride of pickled salmon

表 2 不同温度条件下加入蒸汽时间与氯化物总量减少百分比的关系

Table 2 Relationship between steaming time and reduction ratio of total chloride in different temperature conditions

烹饪温度/°C	烹饪时间/min	关系表达式	$K$	$b$	$R^2$
160	16	$P=(k \times t_2 + b) \times 100\%$	0.006 8	0.08	0.90
180			0.009 7	0.12	0.99
200			0.008 6	0.16	0.93
220			0.008 7	0.19	0.90

表 3 不同烹饪条件对三文鱼的肌纤维长径和短径的影响

Table 3 Long diameters and short diameters of salmon fibres under different cooking conditions

烹饪温度/°C	烹饪时间/min	蒸汽时间/min	肌纤维长径/ $\mu\text{m}$	肌纤维短径/ $\mu\text{m}$
180	4	无	142.12±13.22 <sup>a</sup>	82.89±7.37 <sup>a</sup>
180	8	无	130.67±10.55 <sup>b,c,d</sup>	82.53±7.45 <sup>a</sup>
180	12	无	124.38±11.43 <sup>c,d,e</sup>	83.74±6.57 <sup>a</sup>
180	16	无	119.78±11.36 <sup>e,f,g</sup>	80.82±6.80 <sup>a</sup>
180	20	无	111.39±11.09 <sup>g,h</sup>	80.72±9.68 <sup>a</sup>
180	16	4	122.37±11.63 <sup>d,e,f</sup>	80.27±6.80 <sup>a</sup>
180	16	8	132.90±12.43 <sup>a,b,c</sup>	83.87±9.87 <sup>a</sup>
180	16	12	135.82±12.96 <sup>a,b</sup>	81.46±6.47 <sup>a</sup>
160	16	无	120.39±14.05 <sup>e,f,g</sup>	84.82±6.41 <sup>a</sup>
200	16	无	113.56±12.21 <sup>f,g,h</sup>	81.72±6.28 <sup>a</sup>
220	16	无	109.60±10.65 <sup>h</sup>	84.45±7.00 <sup>a</sup>

注: 同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ( $p < 0.05$ )。

## 2.4 高温蒸过程三文鱼肌纤维扫描电镜微观

### 结构观察结果

图 6 为不同烹饪条件下, 三文鱼的扫描电镜图, 对肌纤维的长径和短径进行测量, 结果见表 3。从图 6a~6e 可以看出, 在 180 °C 条件下, 随着加热时间的延长, 腌制三文鱼的肌纤维间的间隙变小, 且肌纤维与肌内膜发生分离, 肌内膜完整性逐渐被破坏。对肌纤维长径的测量结果表明, 随着烹饪时间的延长,

肌纤维的长径从加热 4 min 时的 142.12  $\mu\text{m}$  减少至加热 20 min 时的 111.39  $\mu\text{m}$ , 鱼肉在烹饪过程中整体受热收缩<sup>[22,23]</sup>。通过对比不同烹饪温度条件下 (图 6i~6k) 三文鱼的肌纤维长径, 也可发现随着温度的升高, 肌纤维长径变小, 鱼肉纤维收缩。但烹饪温度和烹饪时间对三文鱼肌纤维的短径均没有显著影响 ( $p > 0.05$ )。随着高温或长时间烹饪, 肌纤维的进一步收缩将使鱼肉变硬, 增加盐分的传质阻力, 在烹饪后期将不易于盐分的进一步脱除<sup>[24]</sup>, 这可能是引起减盐模型中  $a$  值在 220 °C 出现减小的原因。而通过对比加入不同蒸汽



时间条件下,三文鱼的 SEM 图(图 6d~6h)可以发现,增加蒸汽时间,三文鱼的肌纤维间的间隙变小,排列变紧密,加入 12 min 蒸汽(图 6h)时,肌纤维连在一起,肌内膜已发生相当程度的热变性,几乎全部消失<sup>[20]</sup>,这与高温或长时间烹饪相似,说明,加入蒸汽加速了鱼肉蛋白的变性。而表 3 的结果还表明,在 180 °C 烹饪 16 min 条件下,随着加入蒸汽时间的延

长,鱼肉肌纤维的长径增大。在无蒸汽条件下,肌纤维的长径为 119.78  $\mu\text{m}$ ,而加入 12 min 蒸汽时,肌纤维长径为 135.82  $\mu\text{m}$ 。表明,加入蒸汽可以在一定程度上减缓烹饪过程中鱼肉肌纤维的收缩,尤其对于烹饪后期,可降低盐分在鱼肉中的传质阻力,使盐分更容易被脱除。

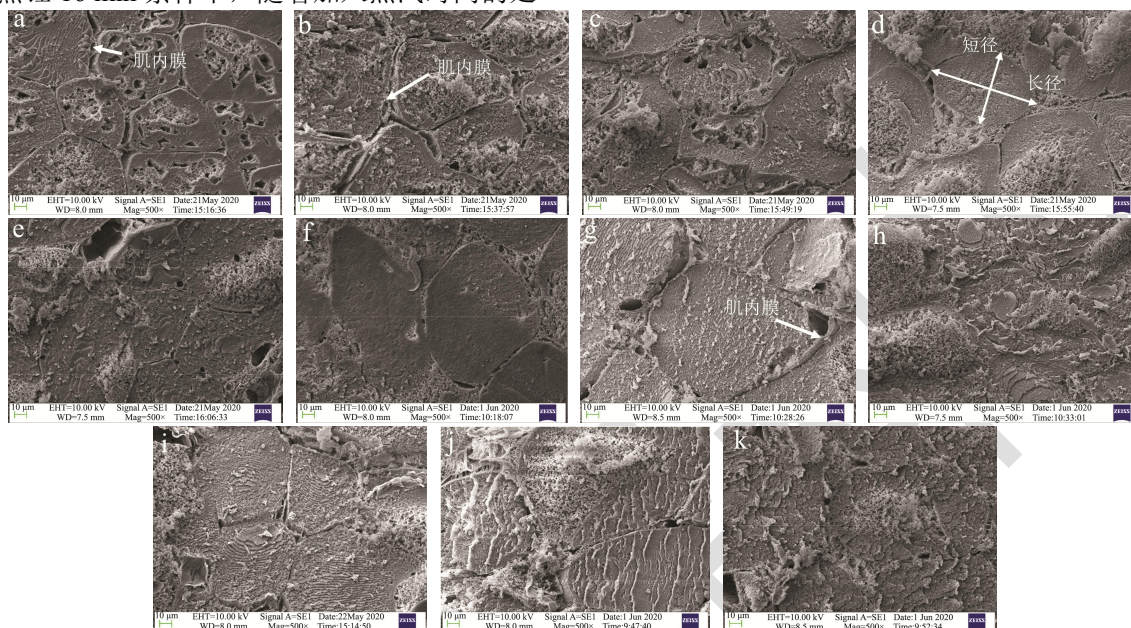


图 6 不同烹饪条件下三文鱼的微观结构变化

Fig.6 Microstructure changes of salmon under different cooking conditions

注: a: 180 °C 加热 4 min, 无蒸汽; b: 180 °C 加热 8 min, 无蒸汽; c: 180 °C 加热 12 min, 无蒸汽; d: 180 °C 加热 16 min, 无蒸汽; e: 180 °C 加热 20 min, 无蒸汽; f: 180 °C 加热 16 min, 4 min 蒸汽; g: 180 °C 加热 16 min, 8 min 蒸汽; h: 180 °C 加热 16 min, 12 min 蒸汽; i: 160 °C 加热 16 min, 无蒸汽; j: 200 °C 加热 16 min, 无蒸汽; k: 220 °C 加热 16 min, 无蒸汽。

### 3 结论

研究表明,在高温蒸煮过程中,烹饪温度升高、烹饪时间延长以及加入蒸汽均使得蒸煮损失增加,而蒸煮损失的增加是氯化物总含量减少的主要因素。在 180 °C~220 °C 范围内,不加蒸汽以及加入 6 min 蒸汽,均符合多孔介质的传质传热数学模型。研究结果还表明,加入蒸汽时间与  $P$  值符合线性关系, $P$  值随加入蒸汽时间延长而增加,一方面是由于,加入蒸汽后,增强了鱼肉的传热推动力,增加了蒸煮损失,盐分随水分流出而被脱除,另一方面,加入蒸汽在鱼肉表面凝结成液态水,起到冲刷作用,带走了鱼肉表面的部分盐分。同时,通过 SEM 对三文鱼微观结构进行观察,结果表明,随着烹饪温度升高和时间延长,三文鱼肌纤维间的间隙变小,排列变紧密,且肌纤维长径减小,而加入蒸汽可以加速鱼肉蛋白的变性,并且在一定程度上减缓烹饪过程中鱼肉肌纤维的收缩,可降低盐分在鱼肉中的传质阻力,使盐分更容

易被脱除。

### 参考文献

- [1] 刘越,耿延敏,朱亚成.中国《居民膳食指南》演变及启示[J].四川体育科学,2017,36(4):21-25
- [2] 李桂兰.健康生活要做到“三减三健”[J].江苏卫生保健,2017,9:42
- [3] 中国居民减盐核心信息十条[J].内科,2019,14(4):396
- [4] Kim S M, Kim T K, Kim H W, et al. Quality characteristics of semi-dried restructured jerky processed using super-heated steam [J]. Foods, 2021, 10(4): 762
- [5] Alfay A, Kiran, B V, Jeevitha G C, et al. Recent developments in superheated steam processing of foods-a review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2016, 56(13): 201-208
- [6] 王勇,李阿敏,姜欣,等.蒸烤箱高温蒸汽脱脂减盐效果研究 [C]/2020 年中国家用电器技术大会论文集.中国宁波,2020: 1609-1612

- [7] Yu L C, Zzaman W, Akanda M J H, et al. Influence of superheated steam cooking on proximate, fatty acid profile, and amino acid composition of catfish (*Clarias batrachus*) fillets [J]. Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2017, 17(5): 935-943
- [8] Wahidu Zzaman, Rajeev Bhat, Tajul Aris Yang, et al. Influences of superheated steam roasting on changes in sugar, amino acid and flavour active components of cocoa bean (*Theobroma cacao*) [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(13): 4429-4437
- [9] Zhang Nachuan, Gao Yuqi, Tong Litao, et al. Superheated steam processing improved the qualities of oats flour and noodles [J]. Journal of Cereal Science, 2018, 83: 42-48
- [10] HU Yueming, WANG Lijuan, ZHU Hong, et al. Superheated steam treatment improved flour qualities of wheat in suitable conditions [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2017, 41(6): e13238
- [11] 冯瑞红,包玉龙,王勇,等.蒸汽辅助烤制技术在肉类烹饪中的应用[J].食品工业科技,2020,41(8): 347-352, 359
- [12] Aguilera J M. Relating food engineering to cooking and gastronomy [J]. Comprehensive Reviews in Food Science & Food Safety, 2018, 17(4): 1021-1039
- [13] Kim T K, Hwang K E, Kim Y B, et al. Effects of pre-cooking methods on quality characteristics of reheated marinated pork loin [J]. Korean Journal for Food Science of Animal Resources, 2018, 38(5): 970-980
- [14] 陈新欣.过热蒸汽在腊肉方便菜肴中的应用研究[D].长沙:湖南农业大学,2017
- [15] Zuo H, Han L, Yu Q, et al. Proteomic and bioinformatic analysis of proteins on cooking loss in yak longissimus thoracis [J]. European Food Research and Technology, 2018, 244(7): 1211-1223
- [16] GB/T 5009.44-2016,食品安全国家标准食品中氯化物的测定[S]
- [17] Wattanachant S, Benjakul S, Ledward D A. Effect of heat treatment on changes in texture, structure and properties of Thai indigenous chicken muscle [J]. Food Chemistry, 2005, 93(2): 337-348
- [18] 吴兵,张立彦.加热对三黄鸡腿肉特性的影响研究[J].食品工业科技,2011,32(5):108-112
- [19] 计红芳,张令文,王方,等.加热温度对鹅肉理化性质、质构与微观结构的影响[J].食品与发酵工业,2017,43(3):89-93
- [20] Nathamol Chindapan, Supatcha Soydok, Sakamon Devahastin. Roasting kinetics and chemical composition changes of Robusta coffee beans during hot air and superheated steam roasting [J]. Journal of Food Science, 2019, 84(2): 292-302
- [21] 骆晓敏.鸡翅根烘制过程的脱水特性及品质变化研究[D].广州:华南理工大学,2017
- [22] 臧大存.鸭肉嫩度影响因素及变化机制的研究[D].南京:南京农业大学,2007
- [23] 李超.加热处理对鸭肉嫩度的影响及其机制研究[D].南京:南京农业大学,2012
- [24] 杨登玲.不同处理方式对鸭肉传质过程及肉质特性的影响[D].合肥:合肥工业大学,2018