

三文鱼燃气烤制过程单增李斯特菌失活数值模拟

王 伶, 唐宇宏, 赵 清, 刘斌雄, 田美玲, 方 婷, 李长城*

(福建农林大学食品科学学院 福州 350002)

摘要 旨在构建三文鱼扒燃气烤制过程的热量传递模型,并结合微生物热失活动力学评估不同烤制条件下单增李斯特菌的失活行为。通过构建一维非稳态传热模型,基于有限差分法和最小二乘优化算法求解模型参数,获得三文鱼扒烤制过程中的温度分布;再结合“一般法”计算单增李斯特菌的致死量。结果表明,三文鱼扒的热扩散系数、火焰侧对流换热系数、空气侧对流换热系数分别为 $1.83 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, $15.18 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ 和 $16.36 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ 。验证试验显示,模型可用于描述三文鱼扒燃气烤制过程中的热量传递,中心温度预测值与实测值之间的 RMSE 介于 $1.48 \sim 3.33 \text{ C}$ 。此外,场景模拟计算表明,如果三文鱼扒烤制过程中翻转不均匀,即使加热至中心温度为 71 C ,则单增李斯特菌仍可能存活。在三文鱼扒烤制过程中,以 2, 3, 4 min 或 5 min 间隔翻转,当中心温度达到 71 C 时,各位置的单增李斯特菌累积致死量均大于 $5.21 \text{ lg}(\text{CFU}/\text{g})$ 。本研究结果可为三文鱼安全烹饪提供科学指导。

关键词 三文鱼; 单增李斯特菌; 燃气烤制; 热量传递; 数值模拟

文章编号 1009-7848(2024)04-0211-12 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.04.020

单增李斯特菌是一种常见的可导致人畜共患病的食源性致病菌,孕妇、婴幼儿、老年人和免疫缺陷病人是主要的易感人群,人体感染单增李斯特菌可引发脑膜炎、败血症和孕妇流产等^[1]。此外,该菌可导致单增李斯特菌病,其发病率虽然不高,但死亡率高达 30%^[2]。研究表明,单增李斯特菌在自然界,以及包括三文鱼在内的各种水产品或加工环境中均有广泛检出。2011—2012 年,欧洲食品安全局(EFSA)针对即食食品的基础监测表明,冷熏三文鱼中单增李斯特菌在抽样和货架期终点的检出率高达 17.3%和 16.0%,其中,菌落数大于 $100 \text{ CFU}/\text{g}$ 的比例分别为 1.7%和 2.0%^[3]。2019—2023 年,欧洲食品和饲料快速警报系统记录了 86 起与鱼类产品中存在单增李斯特菌有关的警报通知,主要涉及的产品为三文鱼^[4]。在中国, Li 等^[5]针对全国鱼类、甲壳类和贝类的安全监测表明,3 种水产品中的单增李斯特菌检出率分别为 2.6%, 2.0%, 2.3%。2015 年,广州机场出入境检验检疫局从进口的连续 3 批冰鲜三文鱼中检出单增李斯特菌^[6]。2018 年,尤明亮^[7]对天津市售的包括三文鱼

在内的生食鱼类的监测表明,单增李斯特菌的污染率为 6.2%。宁雪等^[8]的调查表明,2019—2021 年上海市进口水产品中单增李斯特菌的总检出率为 4.63%,其在三文鱼中的检出率为 5.43%。由此可知,三文鱼中的单增李斯特菌污染已引起国内外的广泛关注。

三文鱼在捕捞、分割等过程中不可避免地通过交叉污染途径而携带单增李斯特菌;同时,冷链物流中的温度波动可能导致产品品质劣变,鱼肉硬度和弹性下降^[9]。经加工的鱼肉松散,其内部也可能受到单增李斯特菌的渗透污染。虽然在规范的厨房热加工烹饪操作过程中,鱼体表面和内部的菌体可彻底被灭活,然而大部分消费者选择生食或轻度煎烤后食用。有研究表明,生食三文鱼具有一定的安全风险^[10]。就轻度煎烤的三文鱼而言,理论上其安全风险相对较低,然而,在煎烤温度或时间不足的情况下,仍可使单增李斯特菌等病原微生物存活,进而对人体健康造成威胁。目前,关于三文鱼中单增李斯特菌的研究主要集中于生食产品的检测、分离^[11]、生长预测^[12],以及耐热性(如 D 、 z 值)测定^[13],尚无煎烤过程中的热失活评价报道。此外,近年来,我国消费者对三文鱼的需求量呈现爆发性增长,市场主要依靠进口,仅 2022 年前 10 个月的进口总金额即达 6.28 亿美元^[14]。开展三文鱼煎烤过程中单增李斯特菌的失活研究具有

收稿日期: 2023-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(31601393);福建省自然科学基金面上项目(2021J01131015)

第一作者: 王伶,女,硕士生

通信作者: 李长城 E-mail: changcheng_li@fafu.edu.cn

重要意义。

计算机模拟和数值分析方法已广泛应用于解决食品杀菌过程中的传热问题^[15-17]。Welt等^[18]较详细地综述了传热过程中的差分方法。Huang^[19]建立了用于描述法兰克福香肠巴氏杀菌过程的一维传热模型,并采用数值方法求解加热和冷却过程中的表面对流换热系数;同时,结合微生物致死动力学,验证了所建立模型与实测杀菌效果的一致性。李长城等^[20]建立了用于描述罐装三文鱼鱼籽巴氏杀菌过程单增李斯特菌失活的“二维传热-热失活”联合模型。

综上,本研究旨在构建三文鱼扒燃气烤制过程的热量传递模型,并结合微生物热致死动力学模拟不同烤制场景条件下单增李斯特菌的失活行为,以期为三文鱼热处理规程及安全烹饪指南的制定提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器

三文鱼扒,福州山姆会员超市,用游标卡尺测量其厚度约为17.40~24.00 mm,宽度10.00~12.00 cm,长度12.00~15.00 cm。

BDZ-290A卡式烤炉,中山市菱亚莉电气贸易有限公司;卡式丁烷气罐(净含量250 g,丁烷含量 $\geq 95\%$),岩谷气具(珠海)有限公司。

USB-24080A温度采集器,美国MCC公司;T型热电偶(TMTSS-032G-6),美国Omega公司。

1.2 试验方法

1.2.1 三文鱼扒燃气烤制试验及其温度测量 烤制开始前,让燃气烤炉空置燃烧约10 min,待火焰温度稳定后,将三文鱼扒置于烤架上加热,并按一定的时间间隔翻转鱼扒。同时,通过连接计算机的温度采集器记录鱼扒的中心及表面温度,以及烤架下方火焰侧和上方空气侧温度。如图1所示,测量鱼扒中心温度时,通过AB胶将热电偶探头固定于内径为1.0 mm的注射器针头,再将其于鱼扒边缘1/2厚度处,沿着水平方向向内插入,插入深度约3 cm(图1a);测量鱼扒表面温度时,分别将2根热电偶以相反的方向穿入鱼扒,缠绕1圈,防止翻转时热电偶脱落,并使热电偶探头附着在鱼扒

上、下表面(图1b)。另外,分别使用2根T型热电偶探头,将其中一根固定至烤盘上方约50 cm处(图1c),用于测量鱼扒上侧空气温度;另外一根缠绕至烤盘网格上并固定置于鱼扒下方1 cm处(图1d),以测量下侧空气温度。连接在鱼扒上以及测量空气温度的热电偶探头与温度采集器相连,每隔1 s采集1次温度数据点。

三文鱼燃气烤制过程的简化示意图如图2所示,本研究开展8组烤制试验,烤制过程中随机翻转鱼扒,其厚度、初始温度、上侧空气温度(T_a)和下侧空气温度(T_f)的相关条件如表1所示,除

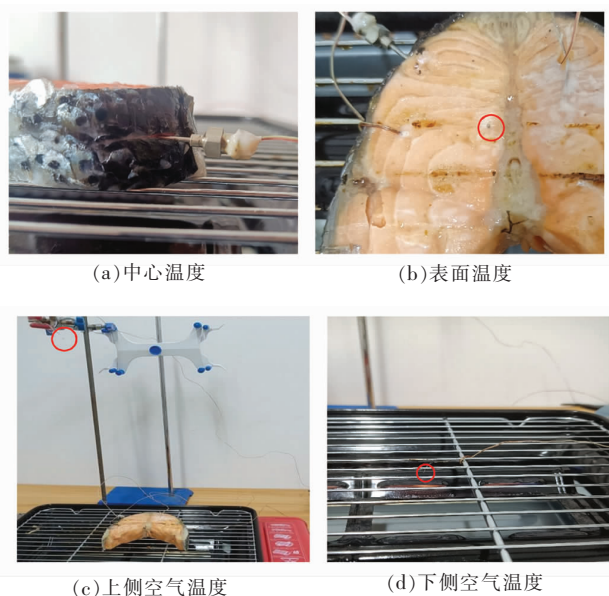


图1 三文鱼燃气烤制过程中的温度测量

Fig.1 Temperature measurement of salmon steak during gas grilling

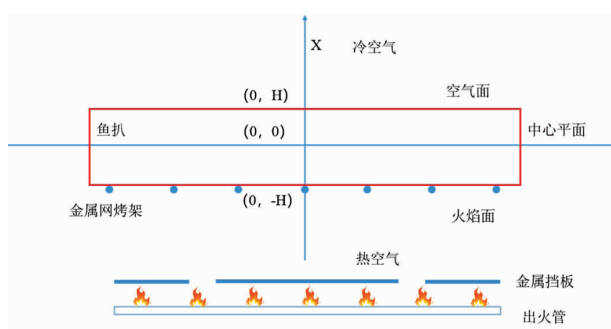


图2 三文鱼扒燃气烤制过程示意图

Fig.2 Schematic diagram of salmon steak during gas grilling

Run1 和 Run3 在烤制过程中保持火力不变之外, 并以时间 t 的分段函数表示。其它组别下侧空气温度随火力大小调节而变化,

表 1 不同传热试验中三文鱼扒厚度及相关温度条件

Table 1 Thickness of salmon steak and related temperature conditions in different heat transfer tests

试验	厚度/mm	鱼扒初始温度/°C	鱼扒上侧空气温度(T_a)/°C	鱼扒下侧空气温度(T_f)/°C
Run1	17.40	7.6	32	200
Run2	21.70	10.8	30	$t < 360 \text{ s}, T_f = 240$ $t > 360 \text{ s}, T_f = 220$
Run3	23.00	13.3	30	225
Run4	17.50	15.8	32	$t < 180 \text{ s}, T_f = 260$ $180 \text{ s} < t < 570 \text{ s}, T_f = 240$ $t > 570 \text{ s}, T_f = 225$
Run5	24.00	16.5	32	$t < 480 \text{ s}, T_f = 240$ $t > 480 \text{ s}, T_f = 210$
Run6	18.00	26.5	45	$t < 580 \text{ s}, T_f = 290$ $t > 580 \text{ s}, T_f = 275$
Run7	23.40	17.1	45	$t < 540 \text{ s}, T_f = 275$ $540 \text{ s} < t < 810 \text{ s}, T_f = 300$ $t > 810 \text{ s}, T_f = 290$
Run8	21.30	17.7	43	$t < 900 \text{ s}, T_f = 265$ $t > 900 \text{ s}, T_f = 225$

1.2.2 三文鱼扒燃气烤制过程的传热模型 因鱼扒并未直接暴露在气体火焰中, 热辐射可忽略不计, 燃气燃烧产生的热量以热对流的方式传递至鱼扒下表面(火焰侧), 再以热传导的方式传递到鱼扒内部, 最后通过热对流传递至鱼扒上方的空气中。该传热过程为一维热传导问题, 可由式(1)描述^[21]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

式(1)中, α ——热扩散系数, m^2/s ; T ——鱼扒中任一时间和位置的温度, $^{\circ}\text{C}$; x ——某一位置与中间平面的垂直距离, mm ; t ——加热时间, s 。

以鱼扒的几何中心为原点, 沿中心垂直面为 x 轴, 鱼扒相对于中间平面对称(图 2)。鱼扒厚度记为 $2H$, 当 $t = 0$ 时, 假设鱼扒上的温度是均匀的, 且等于初始温度(T_0)。鱼扒面向加热介质的面($x = -H$)记为火焰面, 另一面($x = H$)记为空气面。由于三文鱼扒在燃气烤制后尺寸缩小仅为 0.20 mm 左右, 试验中受热过程中鱼扒尺寸变化可忽略不计。

鱼扒火焰侧的边界条件为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} |_{x=-H} = -\frac{h_f}{k} [T_f - T(-H, t)] \quad (2)$$

鱼扒空气侧的边界条件为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} |_{x=H} = -\frac{h_a}{k} [T(H, t) - T_a] \quad (3)$$

式(2)、(3)中, k ——三文鱼的热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$, 三文鱼的热导率为 $0.502 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ^[22]; h_f ——火焰侧表面对流换热系数; h_a ——空气侧表面对流换热系数; T_f ——加热面的温度, $^{\circ}\text{C}$; T_a ——空气面的温度, $^{\circ}\text{C}$; $T(-H, t)$ ——加热面的表面温度, $^{\circ}\text{C}$; $T(H, t)$ ——空气面的表面温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

1.2.3 传热模型及其相关系数的求解 应用显式有限差分法^[23]求解表达式(1), 在数值分析中, 将三文鱼扒均匀地离散成若干层, 如图 3 所示, 在每层内和每层之间, 流出和流入的能量是平衡的。根据图 3, 利用 $T(x, t)$ 关于 t 的一阶差分商 $\frac{\partial T}{\partial t} =$

$$\frac{T_i^{(t+1)} - T_i^t}{\Delta t}, \text{关于 } x \text{ 的二阶差分商 } \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T_{i+1}^t - 2T_i^t + T_{i-1}^t}{\Delta x^2}$$

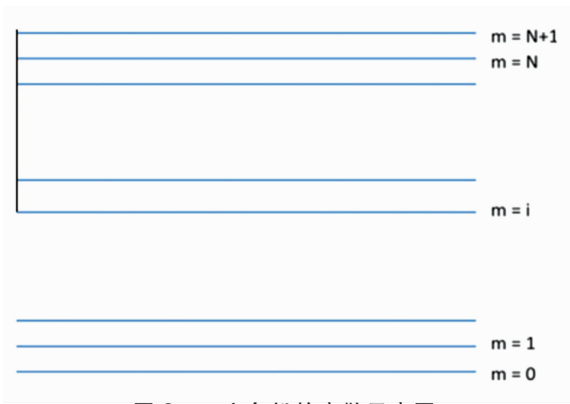


图3 三文鱼扒的离散示意图

Fig.3 Discrete schematic diagram of salmon steak

对表达式(1)进行离散,整理得表达式(4),即:

$$T_i^{t+1} = T_i^t + \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} (T_{i+1}^t - 2T_i^t + T_{i-1}^t) \quad (4)$$

利用边界温度 T 关于 x 的一阶差分商为 $\frac{\partial T}{\partial t}$

$= \frac{T_{i+1}^t - T_i^t}{\Delta x}$, 对表达式(2)和(3)进行离散,整理得表达式(5)、(6):

$$T_{i+1}^t = T_i^t - \frac{h_f \Delta x}{k} [T_i^t - T(-H, t)] \quad (5)$$

$$T_{i+1}^t = T_i^t - \frac{h_a \Delta x}{k} [T(H, t) - T_a] \quad (6)$$

由于通过物理方法直接测定热扩散系数(α)、火焰侧对流换热系数(h_f)、空气侧对流换热系数(h_a)具有较大的难度,本研究通过数值方法予以求解。数值分析过程中,首先假设一组 α 、 h_f 和 h_a 的初值,基于 Matlab(R2018b)求解离散后的传热方程(式(4)、(5)和(6))而获得鱼扒中心温度及表面温度预测值,然后计算其与鱼扒中心温度及表面温度实测值之间的误差,并采用基于最小二乘法的 fitnlm 函数开展迭代计算,搜索使得误差(式(7))最小的参数 α 、 h_f 和 h_a ,此即为所求(试验忽略温度对热扩散系数以及热导率的影响)。

$$\min(\text{error}) = \frac{1}{3} \sum [(T_{1,s} - T_{1,m})^2 + (T_{c,s} - T_{c,m})^2 + (T_{2,s} - T_{2,m})^2] \quad (7)$$

式(7)中, $T_{1,s}$ 、 $T_{2,s}$ 、 $T_{c,s}$ ——两个表面温度和中心温度模拟值,℃; $T_{1,m}$ 、 $T_{2,m}$ 、 $T_{c,m}$ ——两个表面温度和中心温度实测值,℃。燃气烤制时,三文鱼扒在翻转过程中可能会引起热电偶位置的改变,造成

温度测量不准确,为保证参数估计的准确性,仅利用鱼扒第1次翻转之前(记为第1阶段)的表面温度和中心温度进行优化搜索计算。本研究选择 Run1 和 Run2 两组试验第1阶段的数据求解模型参数(α 、 h_f 和 h_a)。

1.2.4 传热过程的计算机模拟 本研究以 Run1 和 Run2 两组试验中除去第1阶段之后的数据及 Run3~Run8 的试验数据对模型进行验证,将 1.2.3 节中拟合获得的 α 、 h_f 和 h_a 代入模型(式(1)~(3)),正向计算鱼扒加热过程中的温度场,通过求解均方根误差(RMSE)值来考察模拟生成的温度曲线与实测值之间的差异。

1.2.5 不同烤制场景下三文鱼中单增李斯特菌的热失活数值模拟 在求解燃气烤制三文鱼扒过程的中心温度曲线后,本研究进一步开展在不同烤制场景条件下(表2)三文鱼扒中单增李斯特菌热失活行为数值仿真模拟,并结合“一般法”求解三文鱼扒不同位置处单增李斯特菌的致死量,其计算公式如式(8)所示^[24]:

$$LR = \frac{1}{D_0} \int_0^t 10^{\frac{T(t)}{z}} dt \quad (8)$$

式(8)中, LR ——单增李斯特菌对数降低值,lg(CFU/g); D_0 和 z ——前期试验通过 Matlab(2018b)数值积分测得的热失活动力学模型参数,其中, $z = 6.22$ ℃,lg(D_0)=12.03,即 $D_0 = 10^{12.07}$ s^[25]。

2 结果与分析

2.1 燃气烤制三文鱼扒过程中的传热系数

本研究仅选择 Run1 和 Run2 两组试验中第1阶段(鱼扒第1次翻转之前)采集的中心温度及表面温度数据,共同拟合燃气烤制过程中三文鱼扒的传热参数(图4a、4b)。表3为模型估计的传热参数结果,其中热扩散系数 α 为 1.83×10^{-7} m/s²,火焰侧有效表面换热系数 h_f 为 15.18 W/(m²·℃),空气侧有效表面换热系数 h_a 为 16.36 W/(m²·℃)。已有文献报道,鳕鱼的热扩散系数为 1.4×10^{-7} m/s²,且大部分食品的热扩散系数在 $1.05 \times 10^{-7} \sim 1.91 \times 10^{-7}$ m/s²之间^[26],与本研究结果相一致;部分研究报道显示,牛肉的热扩散系数范围为 $1.3 \times 10^{-7} \sim 2.15 \times 10^{-7}$ m/s^[27]。对比可知,本试验测得三文鱼的热扩散系数值在正常范围内。

表 2 不同烤制场景的模拟条件

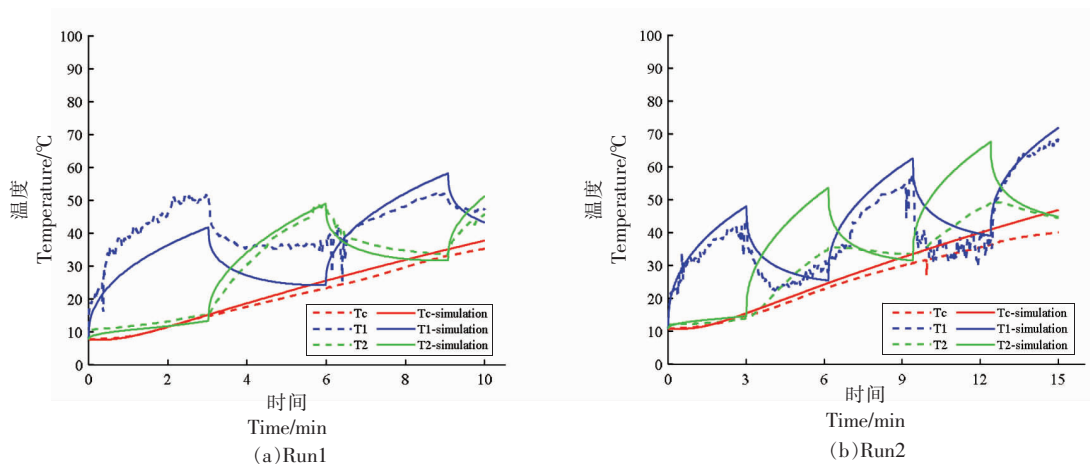
Table 2 Simulation conditions for different grilling scenarios

场景	组别	初始温度/ ℃	上侧空气 温度(T_a)/℃	下侧空气 温度(T_b)/℃	翻转频次及烤制时间
场景一	1	5	35	300	翻转 1 次,正反两面分别烤制 7 min 和 5 min
	2	25	35	300	翻转 1 次,正反两面分别烤制 7 min 和 5 min
	3	25	35	300	翻转 1 次,正反两面分别烤制 8 min 和 5 min
场景二	1	5	35	300	翻转 1 次,正反两面分别烤制 7.5 min 和 9.65 min
场景三	1	5	35	300	均匀翻转,翻转时间间隔为 2 min,共烤制 17.2 min
	2	5	35	300	均匀翻转,翻转时间间隔为 3 min,共烤制 17.2 min
	3	5	35	300	均匀翻转,翻转时间间隔为 4 min,共烤制 17.2 min
	4	5	35	300	均匀翻转,翻转时间间隔为 5 min,共烤制 17.2 min

表 3 三文鱼扒燃气烤制过程传热模型参数估计

Table 3 Parameter estimation of heat transfer model during gas grilling of salmon steak

参数	参数值	标准差	t 值	P 值	95%置信区间	
					上区间	下区间
α	1.83×10^{-7}	3.48×10^{-9}	52.60	4.19×10^{-301}	1.63×10^{-7}	2.03×10^{-7}
h_f	15.18	7.73×10^{-17}	1.96×10^{17}	0	14.39	15.97
h_a	16.36	2.21×10^{-18}	7.39×10^{18}	0	13.41	19.30



注: T_c 、 T_1 、 T_2 分别为中心、初始火焰面和初始空气侧的温度变化曲线实测值,实线为预测值。

图 4 三文鱼扒燃气烤制过程的传热模拟 (Run1 和 Run2)

Fig.4 Simulation of heat transfer during gas grilling of salmon steak (Run1 and Run2)

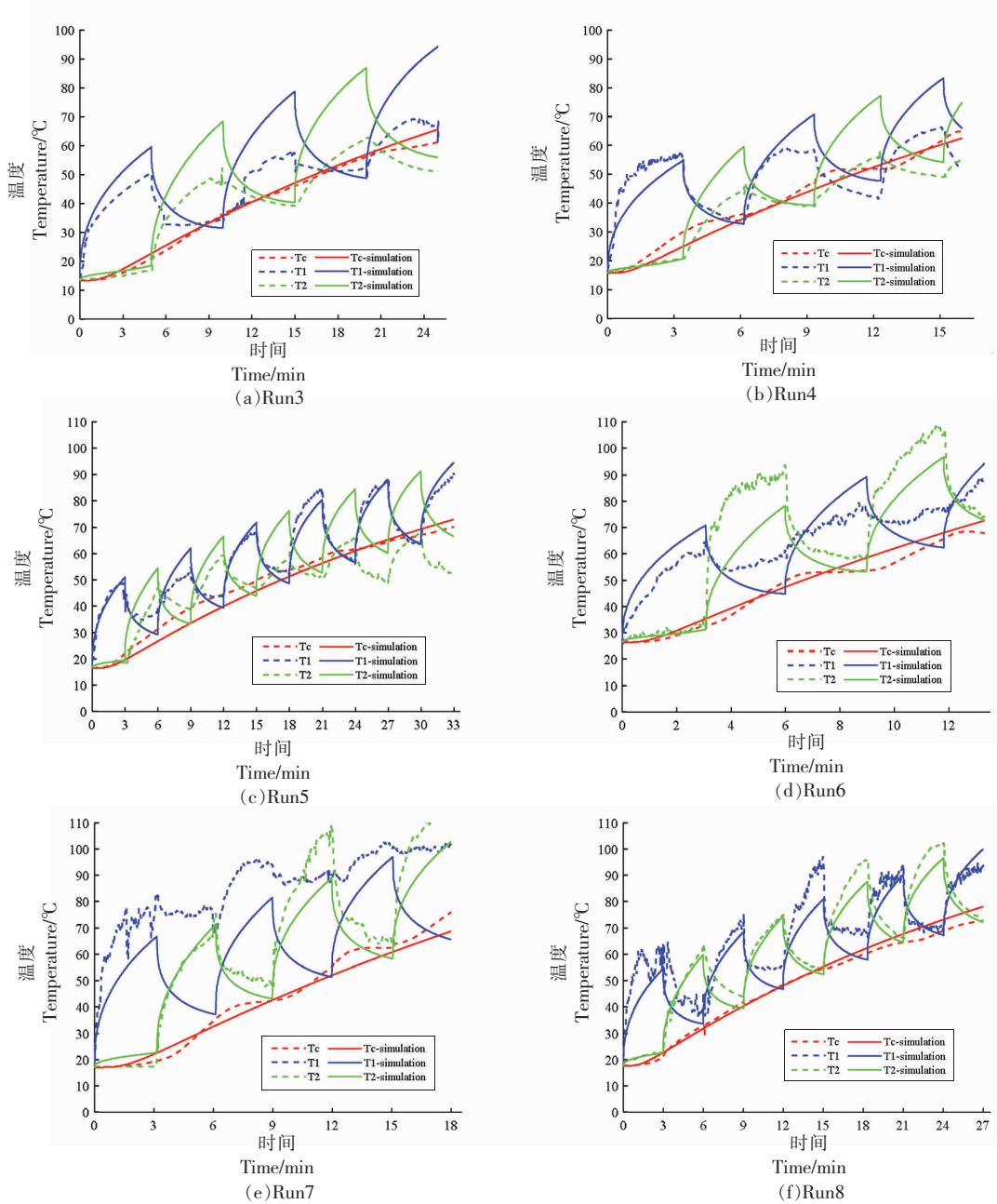
2.2 传热过程的计算机模拟

当三文鱼扒被翻转时,附着在其表面的热电偶探头可能会暴露在空气中或收缩至鱼扒内部,从而导致采集的表面温度出现偏差。因此,在 2.1 节中并未使用第 1 次翻转之后的温度数据进行传热参数拟合计算。然而,翻转过程中,用于测量鱼扒中心温度的热电偶探头仍可稳固于中心平面,

所测中心温度仍较为准确。因此,Run1 和 Run2 第 1 次翻转之后的数据可以用于模型验证。图 4a、4b 显示第 1 阶段之后鱼扒中心位置实测温度与模拟温度较为接近,而表面温度由于翻转时热电偶探头发生移动,从而导致实测温度产生波动。两组试验中心温度实测值与预测值之间均方根误差 (RMSE) 分别为 $1.65\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $3.04\text{ }^\circ\text{C}$ 。另外,图 5a~5f

比较了6组不同烤制条件下(Run3~Run8)鱼扒表面温度和中心温度的测量值与预测值之间的差异, 每组第1阶段模拟的空气侧表面温度与实时测量的温度数据几乎吻合, 随着鱼扒的翻转, 两组数据间逐渐呈现出差异, 而整体变化趋势一致; 其次, 部分试验组(如 Run7)第1阶段火焰侧表面温度模拟值与实测值存在一定的差异, 其原因可能与鱼扒放置于烤架的瞬间温度探头受到振荡相

关, 随着鱼扒的翻转, 两组数据间差异也因此进一步放大。由图 5a~5f 还可知, 在 Run3~Run8 中, 每组中心温度模拟值与实测值较为接近, 其 RMSE 分别为 1.48, 2.65, 3.33, 2.90, 3.15 °C 和 2.40 °C, 表明模拟求解的三文鱼热扩散系数(α)及有效表面换热系数(h_f 和 h_a)准确性较高, 构建的传热模型可以用来描述三文鱼扒在燃气烤制过程中的温度分布。



注: Tc, T1, T2 分别为中心、初始火焰面和初始空气侧的温度变化曲线实测值, 实线为预测值。

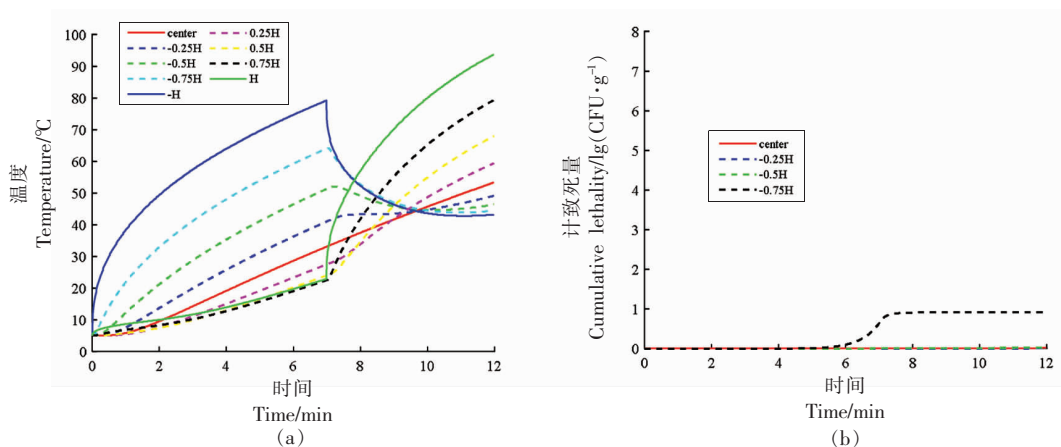
图 5 三文鱼扒燃气烤制的传热模拟 (Run3~Run8)

Fig.5 Simulation of heat transfer during gas grilling of salmon steak (Run3~Run8)

2.3 不同烹饪场景下的单增李斯特菌热失活模拟

2.3.1 场景一：基于燃气烤制全熟牛排的烹饪条件烤制三文鱼。目前尚未见有关于三文鱼扒烤制过程中微生物安全方面的研究报道，而牛排作为一种在家庭及餐厅的典型煎烤食物，已有相关烹饪加工指南。一般认为牛排的中心温度达到 71 °C 时即全熟状态^[29]，以厚度为 1.91 cm 的牛排为例，指南推荐正反两面分别烤制 7 min 和 5 min。因此，假设以此条件烤制经过预冷处理的三文鱼扒，当鱼扒初始温度为 5 °C，火焰侧温度为 300 °C，鱼

扒上侧空气温度为 35 °C 时，仿真计算的温度分布和单增李斯特菌失活结果如图 6 所示。模拟结果表明，燃气烤制结束时，中心温度为 53.33 °C，由于翻转后三文鱼扒 -H、-0.25H、-0.5H、-0.75H 位置处距离火焰侧较远，温度均低于中心温度(图 6a)；另外，如图 6b 所示，当鱼扒加热 12 min 后，除 -0.75H 处单增李斯特菌致死量接近于 1 lg(CFU/g) 以外，中心位置、-0.25H 和 -0.5H 处几乎未失活。因此，在该条件下，中心温度不能成为评估细菌杀灭效果的参照点，同时，燃气烤制牛排的方法不适用于冷藏后三文鱼扒的烹调。



注：H、0.25H、0.5H、0.75H 以及 -H、-0.25H、-0.5H、-0.75H 分别表示以几何中心平面距离空气面、火焰面的不同距离，如图 2，下同。

图 6 三文鱼扒不同位置的温度分布(a)及单增李斯特菌的累积致死量(b)

Fig.6 Temperature distribution (a) and the cumulative lethality of *Listeria monocytogenes* (b) at different positions of salmon steak

如果将三文鱼扒的初始温度升高至 25 °C，而厚度 (1.91 cm) 及正反两面烤制时间 (7 min+5 min) 保持不变，其温度分布和失活模拟结果如图 7 所示。同样地，加热至终点时，鱼扒中心位置处的温度并非最低，约为 67 °C，未达到 71 °C；另外，中心位置和 -0.25H 处单增李斯特菌的致死量分别为 2.94 lg(CFU/g) 和 1.34 lg(CFU/g)，均小于 5 lg(CFU/g)(图 7b)。因此，当三文鱼中单增李斯特菌的污染浓度较高时，食用该条件烤制的鱼扒仍存在安全隐患。

本研究继续模拟了三文鱼扒在初始温度 25 °C、正反两面加热时间分别为 8 min 和 5 min 时的温度分布和单增李斯特菌热失活情况，结果如图 8 所示。到达加热终点时，鱼扒中心温度为 70.43

°C(图 8a)，此时，中心位置、-0.5H、-0.75H 处对应的单增李斯特菌理论致死量分别为 10.01, 29.31 lg(CFU/g) 和 1 272.68 lg(CFU/g)(图 8b)，已远大于实际中可能的污染量，而 -0.25H 处的杀菌量 4.89 lg(CFU/g) 不足 5 lg(CFU/g)。因此，该场景条件下的终点温度仍不能作为全熟的参考标准。

2.3.2 场景二：三文鱼扒加热至中心温度为 71 °C

场景二中，三文鱼扒(厚度 1.91 cm)的初始温度为 5 °C，当加热至中心温度到达 35.3 °C 时进行翻转，然后持续加热至中心温度达 71 °C 时终止，温度及单增李斯特菌失活模拟结果如图 9 所示。加热至 35.3 °C 耗时 7.5 min(450 s)，至终止时，累积耗时 17.15 min(1 029 s)。与 2.3.1 节中结果类似，翻面后部分位置的温度低于中心温度，中心位置

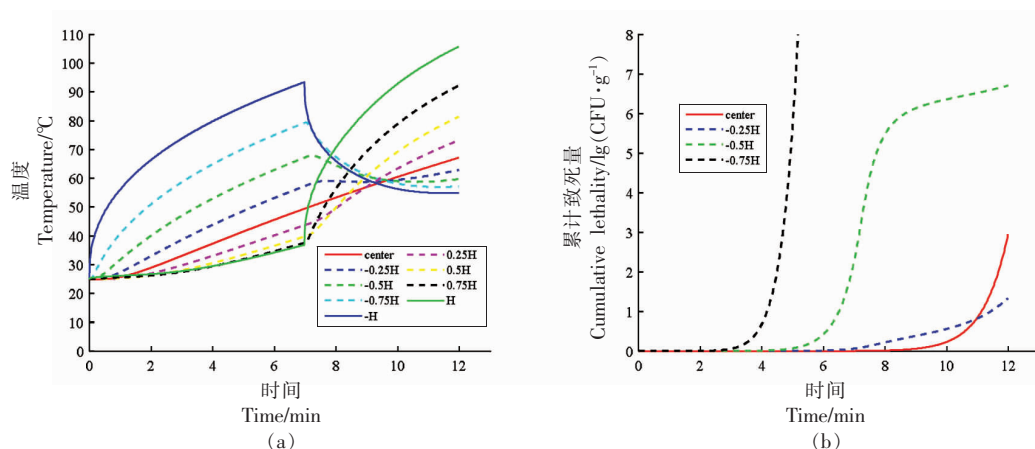


图7 初始温度 25 °C、加热时间 12 min 条件下,三文鱼扒不同位置的温度分布(a)及单增李斯特菌的累积致死量(b)

Fig.7 Temperature distribution (a) and the cumulative lethality of *Listeria monocytogenes* (b) at different positions of salmon steak with the initial temperature of 25 °C and heating time of 12 min

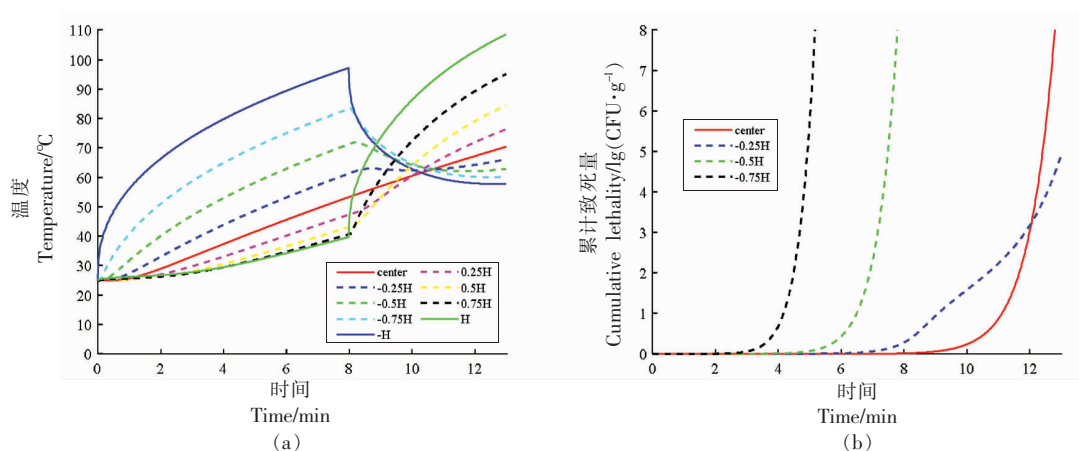


图8 初始温度 25 °C,加热时间 13 min 条件下,三文鱼扒不同位置的温度分布(a)及单增李斯特菌的累积致死量(b)

Fig.8 Temperature distribution (a) and the cumulative lethality of *Listeria monocytogenes* (b) at different positions of salmon steak with the initial temperature of 25 °C and heating time of 13 min

的单增李斯特菌致死量为 12.57 lg(CFU/g), 但-0.25H,-0.5H,-0.75H 处单增李斯特菌致死量分别仅有 1.20,0.25,2.25 lg(CFU/g),均低于 5 lg(CFU/g)(图 9b)。如果热量能均匀地施加到具有对称几何形状的食品表面,其中心温度为 71 °C 时,可被视为达到全熟状态的终点。然而,场景二中的模拟数据表明,如果加热不均匀,仍不能保证食用安全。

2.3.3 场景三:燃气烤制过程中均匀翻转三文鱼扒 上述场景中已清楚地表明,燃气烤制过程中加热不均匀或导致三文鱼扒熟制不充分,不能确保单增李斯特菌完全失活。因此,在场景三中,三文鱼扒初始温度仍为 5 °C,分别设定翻转时间间

隔为 2,3,4 min 或 5 min 开展模拟计算。模拟结果表明,4 种翻转频率条件下,三文鱼扒的中心温度均在加热 17.2 min(1 032 s)后达到 71 °C;同时,翻转间隔时间越短,也即翻转频率越快时,三文鱼扒的中心温度约接近于整体的最低温度(图 10a1~10d1)。由图 10a2~10d2 可知,每间隔 4 min 翻转,加热终了时,-0.25H 处的累积致死量最低,为 5.21 lg(CFU/g);4 种翻转频率条件下,中心位置、-0.25H,-0.5H,-0.75H 处的单增李斯特菌的累积致死量均较高,大于 5.0 lg(CFU/g)。因此,燃气烤制过程中频繁的翻转能够保证三文鱼扒中温度均匀分布,从而降低单增李斯特菌的存活率。

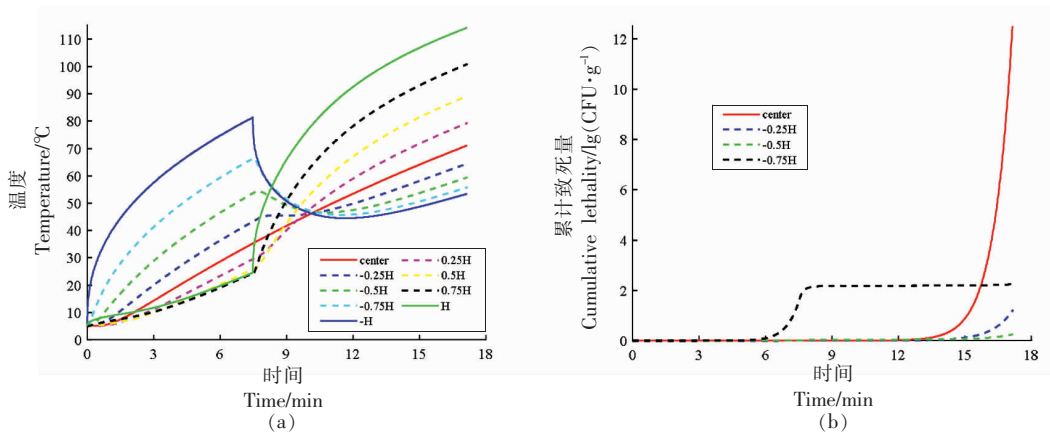


图 9 场景二中三文鱼扒不同位置温度分布 (a) 以及单增李斯特菌的累积致死量 (b)

Fig.9 Temperature distribution (a) and the cumulative lethality of *Listeria monocytogenes* (b)

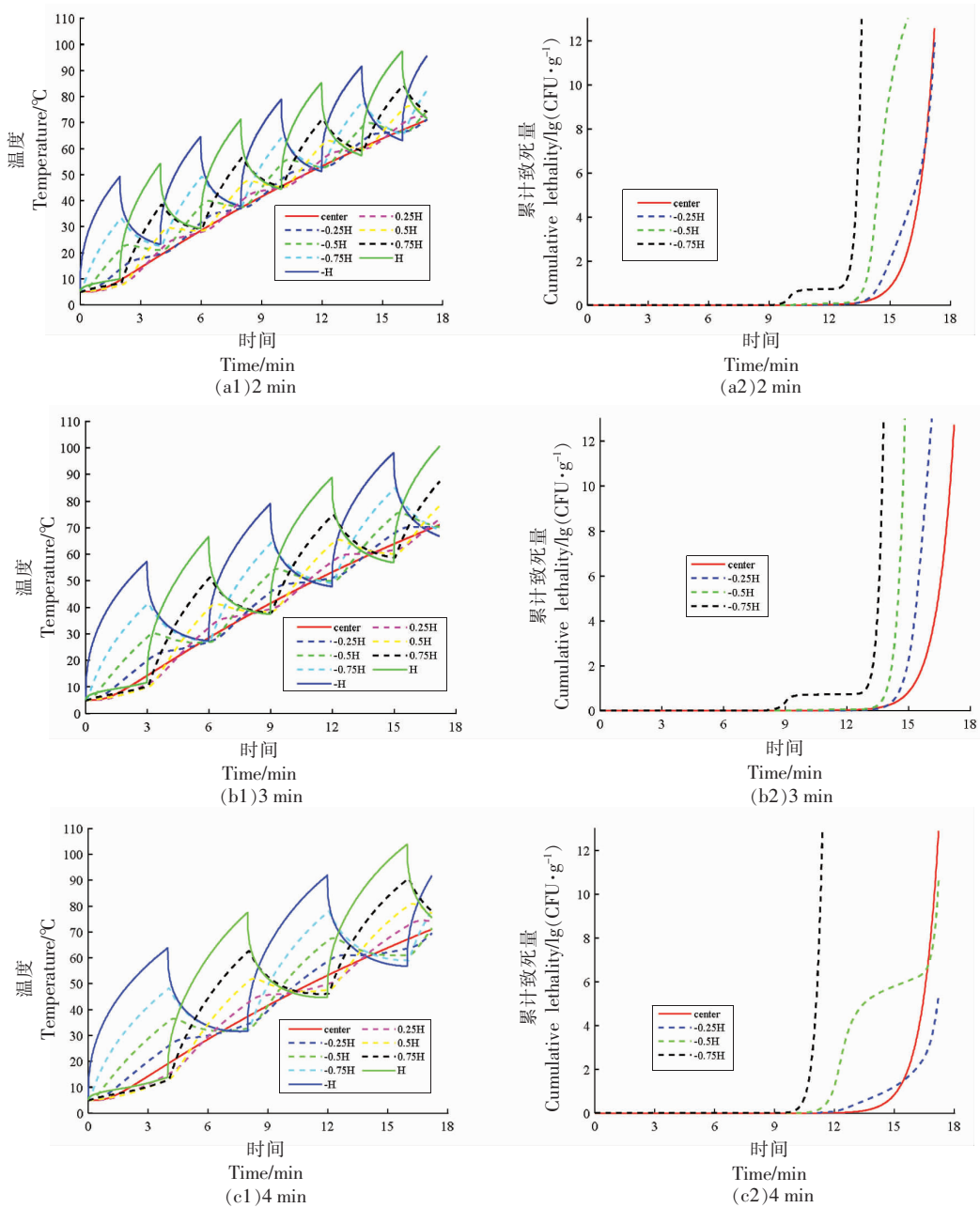


Fig.9 Temperature distribution (a) and the cumulative lethality of *Listeria monocytogenes* (b)

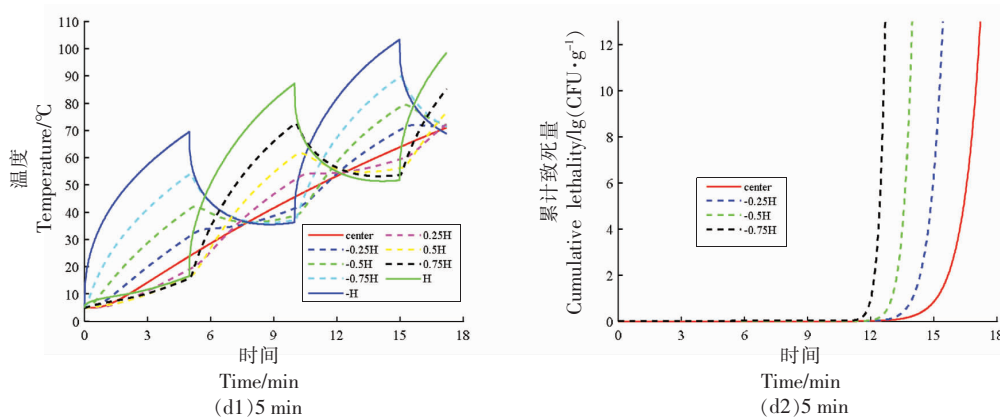


图 10 翻转时间间隔不同时,三文鱼扒不同位置温度分布(a1~d1)以及单增李斯特菌的累积致死量(a2~d2)
Fig.10 Temperature distribution (a1~d1) and the cumulative lethality of *Listeria monocytogenes* (a2~d2)
in different positions of salmon at different flipping intervals

3 结论

本研究构建三文鱼扒燃气烤制过程中的一维传热模型,通过有限差分法结合最小二乘法求解获得三文鱼的热扩散系数、火焰侧表面对流换热系数和空气侧表面对流换热系数;通过验证试验表明,构建的模型及其参数适用于描述三文鱼扒燃气烤制过程中的温度分布;此外,结合单增李斯特菌的热失活动力学参数,开展不同烤制场景条件下,三文鱼扒中单增李斯特菌失活行为数值仿真模拟,结果表明,即使中心温度达到 71 °C,若烤制过程翻转间隔时间不均匀,仍可能导致单增李斯特菌未能完全灭活,均匀且频繁地翻转可以确保其食用安全。本研究结果可为三文鱼热杀菌以及安全烹饪提供科学指导。需要指出的是,从实际操作的角度,对三文鱼烤制过程中心位置或某一平面内部的单增李斯特菌失活量进行定量检测验证,尚存在难度,而从数值分析的角度,构建的传热动力学和微生物热失活动力学集成模型对相关产品中单增李斯特菌的防控仍具有指导意义。

参 考 文 献

- [1] 张玲, 陈曦, 罗丽娟, 等. 一起单增李斯特菌引起新生儿败血症的溯源研究[J]. 疾病监测, 2018, 33(11): 936-939.
ZHANG L, CHEN X, LUO L J, et al. Infection source of a neonatal sepsis case caused by *Listeria monocytogenes* [J]. Disease Surveillance, 2018, 33(11): 936-939.
- [2] BUCHANAN L R, GORRIS G L, HAYMAN M M, et al. A review of *Listeria monocytogenes*: An update on outbreaks, virulence, dose-response, ecology, and risk assessments [J]. Food Control, 2017, 75(5): 1-13.
- [3] European Food Safety Authority. Analysis of the baseline survey on the prevalence of *Listeria monocytogenes* in certain ready-to-eat foods in the EU 20102011 Part A *Listeria monocytogenes* prevalence estimates [J]. EFSA Journal, 2013, 11(6): 3241.
- [4] BOLÍVAR A, GARROTE A, CHOU C, et al. Modeling the growth of six *Listeria monocytogenes* strains in smoked salmon Pâté [J]. Foods, 2023, 12(6): 1123-1123.
- [5] LI Y, PEI X, YAN J, et al. Prevalence of food-borne pathogens isolated from retail freshwater fish and shellfish in China [J]. Food Control, 2019, 99(5): 131-136.
- [6] TECHOO-3. 广州机场检验检疫局: 3批进口冰鲜三文鱼检出单增李斯特菌 [EB/OL]. (2015-06-05) [2023-08-20]. <https://www.tech-food.com/news/detail/n1211708.htm>.
TECHOO -3. Guangzhou Airport Inspection and Quarantine Bureau; *Listeria monocytogenes* detected in 3 batches of imported chilled salmon [EB/OL]. (2015-06-05) [2023-08-20]. <https://www.tech-food.com/news/detail/n1211708.htm>.
- [7] 尤明亮. 2018年天津市生食鱼类单增李斯特菌检测结果分析 [J]. 继续医学教育, 2021, 35(2): 59-60.

- YOU M L. The results analysis of *Listeria monocytogenes* form in the raw fish of Tianjin in 2018[J]. Continuing Medical Education, 2021, 35(2): 59-60.
- [8] 宁雪, 赵丽娜, 张晨, 等. 2019-2021年上海进口肉类及水产品食源性致病菌污染状况分析[J]. 食品安全导刊, 2022(12): 61-67.
- NING X, ZHAO L N, ZHANG C, et al. Contamination analysis of food-borne pathogen from imported meat and aquatic products in Shanghai from 2019 to 2021[J]. China Food Safety Magazine, 2022(12): 61-67.
- [9] 王硕, 谢晶, 杨凯, 等. 三文鱼冷链流通过程中质构、鲜度及感官品质变化规律与水分迁移相关性[J]. 中国食品学报, 2018, 18(5): 173-184.
- WANG S, XIE J, YANG K, et al. The correlation between water distribution and texture, freshness and sensory quality of salmon during low temperature logistics[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(5): 173-184.
- [10] 刘丽敏, 唐宇宏, 刘铖珺, 等. 波动温度条件下生鲜三文鱼中单增李斯特菌生长预测模拟[J]. 中国食品学报, 2022, 22(4): 233-242.
- LIU L M, TANG Y H, LIU C J, et al. Predictive modeling of the growth of *Listeria monocytogenes* in fresh salmon under dynamic temperature conditions [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(4): 233-242.
- [11] THOMAS B, GUYLAINE L, AURÉLIE H, et al. Genetic population structure of *Listeria monocytogenes* strains isolated from salmon and trout sectors in France[J]. Heliyon, 2023, 9(7): 18154.
- [12] JIA Z, BAI W J, LI X T, et al. Assessing the growth of *Listeria monocytogenes* in salmon with or without the competition of background microflora--A one-step kinetic analysis[J]. Food Control, 2020, 114(8): 107139.
- [13] 李长城, 白伟娟, 贾真, 等. 温度和盐含量对三文鱼中单增李斯特菌热失活的影响[J]. 食品工业, 2018, 39(12): 50-53.
- LI C C, BAI W J, JIA Z, et al. Effect of temperature and salt on thermal inactivation of *Listeria monocytogenes* in salmon [J]. The Food Industry, 2018, 39(12): 50-53.
- [14] 共研网. 2022年中国三文鱼进口贸易量及主要地区进口现状分布[EB/OL]. (2023-01-18)[2023-08-20]. https://www.sohu.com/a/630255254_121388365.
- Common Research.com. China salmon import trade volume and distribution of import status by major regions in 2022[EB/OL]. (2023-01-18)[2023-08-20]. https://www.sohu.com/a/630255254_121388365.
- [15] CHEN G, CAMPANELLA O H, PELEG M. Calculation of the total lethality of conductive heat in cylindrical cans sterilization using linear and non-linear survival kinetic models[J]. Food Research International, 2011, 44(4): 1012-1022.
- [16] SARGOLZAEI J, ABARZANI M, AMINZADEH R. Modeling and simulation of hamburger cooking process using finite difference and CFD methods[J]. International Journal of Industrial Chemistry, 2011, 2(1): 52-62.
- [17] 黄蓓蓓. 水产食品罐头热杀菌模拟与优化的研究进展[J]. 包装工程, 2016, 37(13): 99-105.
- HUANG B B. Research progress in simulation and optimization of thermal sterilization of canned aquatic products[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(13): 99-105.
- [18] WELT B A, TEIXEIRA A A, CHAUK V, et al. Explicit finite difference methods for heat transfer simulation and thermal process design[J]. Journal of Food Science, 1997, 629(2): 230-236.
- [19] HUANG L H. Computer simulation of heat transfer during in-package pasteurization of beef frankfurters by hot water immersion[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(3): 839-849.
- [20] 李长城, 贾真, 白伟娟, 等. 罐装三文鱼鱼籽巴氏杀菌过程单增李斯特菌失活数值模拟[J]. 中国食品学报, 2018, 18(1): 184-192.
- LI C C, JIA Z, BAI W J, et al. Numerical simulation of lethality of *Listeria monocytogenes* during pasteurization of canned salmon roe [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(1): 184-192.
- [21] OU D, MITTAL G. Single-sided pan frying of frozen hamburgers with flippings for microbial safety using modeling and simulation[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(1): 33-45.
- [22] PAN Z, SINGH R P, RUMSEY T R. Predictive modeling of contact-heating process for cooking a hamburger patty [J]. Journal of Food Engineering, 2000, 46(1): 9-19.
- [23] HUANG L H. A simplified method for numerical simulation of gas grilling of non-intact beef steaks

- to eliminate *Escherichia coli* O157: H7[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 113(3): 380–388.
- [24] CHANDRA P K, PAUL R S. Applied numerical methods for food and agricultural engineers[M]. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2017: 12–14.
- [25] 唐宇宏. 市售三文鱼中单增李斯特菌分离鉴定及热失活数值模拟[D]. 福州: 福建农林大学, 2023.
- TANG Y H. Isolation, identification and numerical simulation of heat inactivation of *Listeria monocytogenes* in commercial salmon[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2023.
- [26] HELDMAN D R, LUND D B, SABLIOV C. Handbook of food engineering[M]. Boca Raton, Florida: CRC press, 2018: 646–658.
- [27] HUANG L H, LIU L. Simultaneous determination of thermal conductivity and thermal diffusivity of food and agricultural materials using a transient plane-source method [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 95(1): 179–185.

Numerical Simulation of Lethality of *Listeria monocytogenes* during Gas Grilling of Salmon

Wang Ling, Tang Yuhong, Zhao Qing, Liu Binxiang, Tian Meiling, Fang Ting, Li Changcheng*
(College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002)

Abstract The objective of this study was to develop a heat transfer model for gas grilling of salmon steaks and evaluate the inactivation behavior of *Listeria monocytogenes* under different grilling conditions by incorporating microbial thermal inactivation kinetics. The one-dimensional unsteady heat transfer model was used to describe the heat transfer process during gas grilling of salmon, and the model parameters were solved by the combination of the finite difference method and least square optimization algorithm, then the temperature history during gas grilling was also obtained. Finally, the lethality of *Listeria monocytogenes* during gas grilling was calculated by the General Method. The results showed that the thermal diffusion coefficient, convective heat transfer coefficient of flame side and air side were $1.83 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, $15.18 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ and $16.36 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, respectively. Verification tests showed that the developed model can be suitable for describing the heat transfer during gas grilling of salmon, with the RMSE of 1.48–3.33 °C between the model predictions and the measured values. In addition, numerical simulation of different scenario showed that *Listeria monocytogenes* could still survive in salmon steaks if they were unevenly turned during the roasting process, even if the center temperature up to 71 °C, however, if they were flipped evenly with the time interval of 2, 3, 4 min or 5 min during gas grilling, the lethality of *Listeria monocytogenes* at all locations was greater than 5.21 lg(CFU/g) when the center temperature of the salmon steak reached 71 °C. The results of this study can provide scientific guidance for safe cooking.

Keywords salmon; *Listeria monocytogenes*; gas grilling; heat transfer; numerical simulation