

# 蛋清液中大肠杆菌超声协同热处理杀菌动力学研究

迟玉杰<sup>1</sup> 闫露露<sup>1</sup> 赵英<sup>2</sup> 马艳秋<sup>1</sup>

(1. 东北农业大学食品学院, 哈尔滨 150030; 2. 东北农业大学农学院, 哈尔滨 150030)

**摘要:** 利用超声协同热处理蛋清液, 研究其对蛋清液中大肠杆菌的杀菌效果, 运用 Weibull 模型对杀菌动力学过程进行分析, 确定该种处理方法对蛋清液主要功能性质的影响。研究表明, 随着功率(100~600 W)的增大、温度(45.0~57.5℃)的升高和处理时间(2~5 min)的增加, 超声协同热处理对蛋清液中大肠杆菌的杀菌效果显著增强( $P < 0.05$ )。具体表现为: 超声功率由 100 W 增加至 600 W (50.0℃, 3 min) 时, 大肠杆菌菌体浓度降低量由 0.67 lg CFU/mL 增加至 1.24 lg CFU/mL; 热处理温度由 45.0℃ 增加至 57.5℃ (600 W, 3 min) 时, 大肠杆菌菌体浓度降低量由 1.01 lg CFU/mL 增加至 1.80 lg CFU/mL。利用 Weibull 模型对杀菌动力学过程拟合并简化, 得到的 Weibull 模型拟合性较好, 能够预测超声协同热处理不同功率-温度-时间的杀菌动力学过程, 可为蛋清液在超声协同热处理过程中微生物安全性的控制提供理论依据。当超声功率为 300 W (55.0℃, 3 min) 时, 与对照组相比, 蛋清液的凝胶硬度提高了 101.04%, 起泡力提高了 50%。超声协同热处理可有效控制蛋清液中的微生物含量, 并在一定程度上改善蛋清液的功能性质。

**关键词:** 蛋清液; 功能性质; 超声协同热处理; 杀菌动力学

中图分类号: TS253

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)01-0313-09

OSID:



## Inactivation Kinetics of *Escherichia coli* in Egg White Liquid by Ultrasonic-assisted Heats Treatment

CHI Yujie<sup>1</sup> YAN Lulu<sup>1</sup> ZHAO Ying<sup>2</sup> MA Yanqiu<sup>1</sup>

(1. College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

(2. College of Agriculture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** The effect of ultrasonic-assisted heats treatment on *Escherichia coli* and functional properties in egg white liquid was investigated. The inactivation kinetic of *Escherichia coli* was analyzed by fitting with Weibull model. The result showed that the reduction in *Escherichia coli* was enhanced with an increase in ultrasonic power, temperature or time. The reduction in *Escherichia coli* was enhanced from 0.67 lg CFU/mL to 1.24 lg CFU/mL with the increase of ultrasonic power from 100 W to 600 W (50.0℃, 3 min). The reduction in *Escherichia coli* was enhanced from 1.01 lg CFU/mL to 1.80 lg CFU/mL with the increase of temperature from 45.0℃ to 57.5℃ (600 W, 3 min). The Weibull model provided a good fit to the inactivation curves of *Escherichia coli* at different ultrasonic-assisted heats treatment. The simplified Weibull model could be used to predict the process of ultrasonic-assisted heats treatment inactivation kinetic of *Escherichia coli* and provide a theoretical basis of microbial safety control in the ultrasonic-assisted heats treatment processing of egg white liquid. At the same time, when the ultrasonic power was 300 W (55.0℃, 3 min), the gel hardness was increased by 101.04%, while the foam capacity was increased by 50%. In conclusion, ultrasonic-assisted heats treatment could control the microbial content of egg white liquid effectively and improve the functional properties.

**Key words:** egg white liquid; functional properties; ultrasonic-assisted heats treatment; inactivation kinetics

## 0 引言

蛋清液是由鲜蛋经系列加工处理后制得的液蛋

制品, 含有丰富的蛋白质、维生素、矿物质和少量的脂质等, 含水率为 88% 左右<sup>[1]</sup>, 蛋清液营养丰富且含水率较高, 易受食源性致病菌和腐败菌的感

收稿日期: 2019-06-26 修回日期: 2019-08-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0400304)和现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-40-K25)

作者简介: 迟玉杰(1963—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事食品化学及农畜产品深加工研究, E-mail: yjchi323@126.com

染<sup>[2]</sup>。目前,在食品工业中多采用热处理的方法对蛋清液进行杀菌,但由于蛋清蛋白对热敏感,易发生变性,导致其热杀菌的处理强度较低。国内普遍采用的热处理条件为 55.0℃ 处理 3 min<sup>[3]</sup>,但杀菌效果并不理想,市售巴氏杀菌蛋清液 4.0℃ 冷藏下保质期仅为 12 d 左右<sup>[4]</sup>。故开发有效、可行的液蛋杀菌技术已成为国内外关注的焦点。

超声波是指频率大于 20 kHz 的声波,具有频率高、波长短、穿透性强等特点,是一种有效的辅助灭菌方法,适用于液体产品的杀菌,已成功应用于废水处理、饮用水消毒等领域<sup>[5]</sup>。超声波作用于液体介质中会产生局部的瞬间高温,以及剧烈的温度和压力变化,即空化作用,致使细菌细胞壁或细胞膜破坏而死亡<sup>[6]</sup>,实现杀菌的目的。同时超声波的空化作用和机械效应使蛋清蛋白质结构或构象发生变化,从而改变了蛋清液的功能性质<sup>[7-8]</sup>。文献[9]研究了超声波空穴效应诱导·H、·O、·OH等羟基自由基及H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>的产生,及其在杀菌过程中的作用,证实了超声波所引起的化学效应是导致微生物失活的主要原因。文献[10]通过试验证明超声协同热处理具有协同杀菌作用,可显著提高杀菌效率,因此超声波可作为一种有效的协同热杀菌技术。关于超声处理对蛋白质功能性质的影响也有相关研究。文献[11]研究表明超声处理促使大豆分离蛋白凝胶空间网络变得更加致密、均一,热凝胶强度和保水性增强。文献[12]研究发现,超声处理可使蛋清液体系分散、起泡力提高。

因此,本文通过建立杀菌动力学模型研究超声协同热处理对蛋清液中大肠杆菌的杀菌效果,并测定不同条件的超声协同热处理对蛋清液主要功能性质的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 原料与仪器

鲜鸡蛋,采购于本地超市;大肠杆菌(*Escherichia coli*) ATCC 25922,上海鲁微科技有限公司;平板计数琼脂、结晶紫中性红胆盐琼脂等,青岛海博生物技术有限公司;氯化钠、硼酸、氢氧化钠等均为国产分析纯。

SCIENTZ JY92-II N 型超声波细胞粉碎机,宁波新芝生物科技股份有限公司;YX-180B 型高压蒸汽灭菌锅,河北中兴伟业实验仪器有限公司;SW-CJ-1D 型单人单面垂直净化工作台,上海昕仪仪器仪表有限公司;LVDV-II + P 型旋转粘度计,美国 Brookfield 公司;TA-XT plus 型质构分析仪,英国 Stable Micro System 公司。

### 1.2 蛋清液的制备

选择新鲜完整的鸡蛋,经蒸馏水清洗后用 70% 乙醇溶液浸泡 10 min,风干后在无菌的条件下经打蛋、分蛋、搅拌、过滤等工序得鲜蛋清液,并以每瓶 100 mL 分装于已经高压灭菌的锥形瓶中<sup>[13]</sup>,备用。

### 1.3 大肠杆菌活化与接种

参照文献[14]的方法,略有修改。大肠杆菌菌种通过平板计数琼脂培养基于 37.0℃ 活化 24 h,接种环挑取活化后的大肠杆菌于 100 mL 细菌基础培养基中,置于恒温振荡器中,37.0℃ 以 150 r/min 的转速摇菌培养 12 h,此时得到菌体浓度约为  $2.7 \times 10^9$  CFU/mL 的悬菌液,利用 0.85% 生理盐水将其适度稀释,取 1 mL 悬菌液接种于装有蛋清液的锥形瓶中,密封摇匀待处理样品,测得此时蛋清液中约含大肠杆菌  $8.0 \times 10^5$  CFU/mL。

### 1.4 超声协同热处理

将样品置于超声波细胞粉碎机腔内,仪器参数设置为超声频率 20 kHz、工作时间 7 s、间歇时间 3 s。超声波探头浸入蛋清液液面下 2/3 处<sup>[15]</sup>,设置输出功率为 0、100、200、300、400、500、600 W,样品置于温度为 45.0、47.5、50.0、52.5、55.0、57.5℃ 的水浴中,时间为 2、3、4、5 min。每次处理前,使用酒精棉(含 75% 乙醇)反复擦拭超声探头。

### 1.5 大肠杆菌计数

参照文献[16]中平板计数法测定。

### 1.6 数学模型

#### 1.6.1 Weibull 分布

Weibull 分布被广泛应用于不同加工处理方法对微生物失活的动力学分析,是一种可用于描述多种线型的模型<sup>[17]</sup>,可以简洁描述曲线的凹凸行为,该模型假设同一种群细胞或芽孢具有不同的抗性<sup>[18]</sup>。模型表示为

$$\lg \frac{N}{N_0} = - \left( \frac{P}{a_p} \right)^x \quad (1)$$

式中  $N_0$ ——杀菌处理前大肠杆菌菌体浓度, CFU/mL

$N$ ——杀菌处理后大肠杆菌菌体浓度, CFU/mL

$\lg(N/N_0)$ ——杀菌处理后的大肠杆菌残存率对数值

$P$ ——超声功率, W

$a_p$ ——尺度参数  $x$ ——形状参数

其中  $a_p$  反映大肠杆菌残存率降低 1 个对数值所需的功率。 $x$  反映曲线形状,  $x > 1$  时,曲线呈凸状,当  $x < 1$  时,曲线呈凹状,当  $x = 1$  时,曲线为一条直线,可用线性模型拟合。

### 1.6.2 Weibull 模型拟合度评价

基于 Weibull 分布对试验数据进行非线性拟合,采用均方误差  $M_{se}$ 、决定系数  $R^2$ 和精确因子  $A_f$ 评价模型拟合度。 $M_{se}$ 越小, $R^2$ 越接近于 1,表示模型拟合度越高, $A_f$ 越接近于 1,表示模型越精确, $A_f$ 越大,模型的平均精确度越低<sup>[19]</sup>。

### 1.7 蛋清液粘度测定

参照文献[20]的方法,略有修改。取 30 mL 样品于 50 mL 烧杯中,室温(20℃)下利用旋转粘度计测定。测试条件:61 号转子,转速 60 r/min。

### 1.8 蛋清液凝胶性测定

凝胶的制备及测定参照文献[21]的方法,略有修改。取 20 mL 样品于 25 mL 小烧杯中,保鲜膜封口,90.0℃恒温水浴锅中加热 30 min 后取出快速冷却,4.0℃静置 24 h 后放至室温待测,利用质构仪测定。测定条件:探头 p36R,压缩程度 50%,触发值 10.0 g,测试前速度 5 mm/s,测试速度为 2 mm/s,测试后速度为 2 mm/s。

### 1.9 蛋清液起泡性测定

采用机械搅打法<sup>[22]</sup>测定,并加以修改。蛋清液用 pH 值 9.0 的硼酸-氢氧化钠缓冲溶液 10 倍稀释<sup>[15]</sup>,取 200 mL 稀释液经高速组织捣碎机室温下

以 12 000 r/min 的速度搅打 1 min,立即测定此时泡沫体积,室温下静置 25 min 后,测定此时泡沫体积。

起泡力  $F_c$ 与泡沫稳定性指数  $F_s$ 计算公式为

$$F_c = \frac{V_1}{V_0} \times 100\% \quad (2)$$

$$F_s = \frac{V_2}{V_1} \times 100\% \quad (3)$$

式中  $V_0$ ——样品稀释液体积,mL

$V_1$ ——搅打 1 min 后泡沫体积,mL

$V_2$ ——静置 25 min 后泡沫体积,mL

### 1.10 数据处理

每个试验重复 3 次,利用 SPSS 22.0 软件对数据进行显著性分析,以  $P < 0.05$  为显著性差异,利用 Origin Pro 8.6 和 Excel 2013 进行模型拟合与绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 杀菌效果分析

为建立超声协同热处理(功率、温度、时间)的杀菌动力学模型,研究不同条件的超声协同热处理对蛋清液中大肠杆菌残存率的影响,结果如图 1 所示。

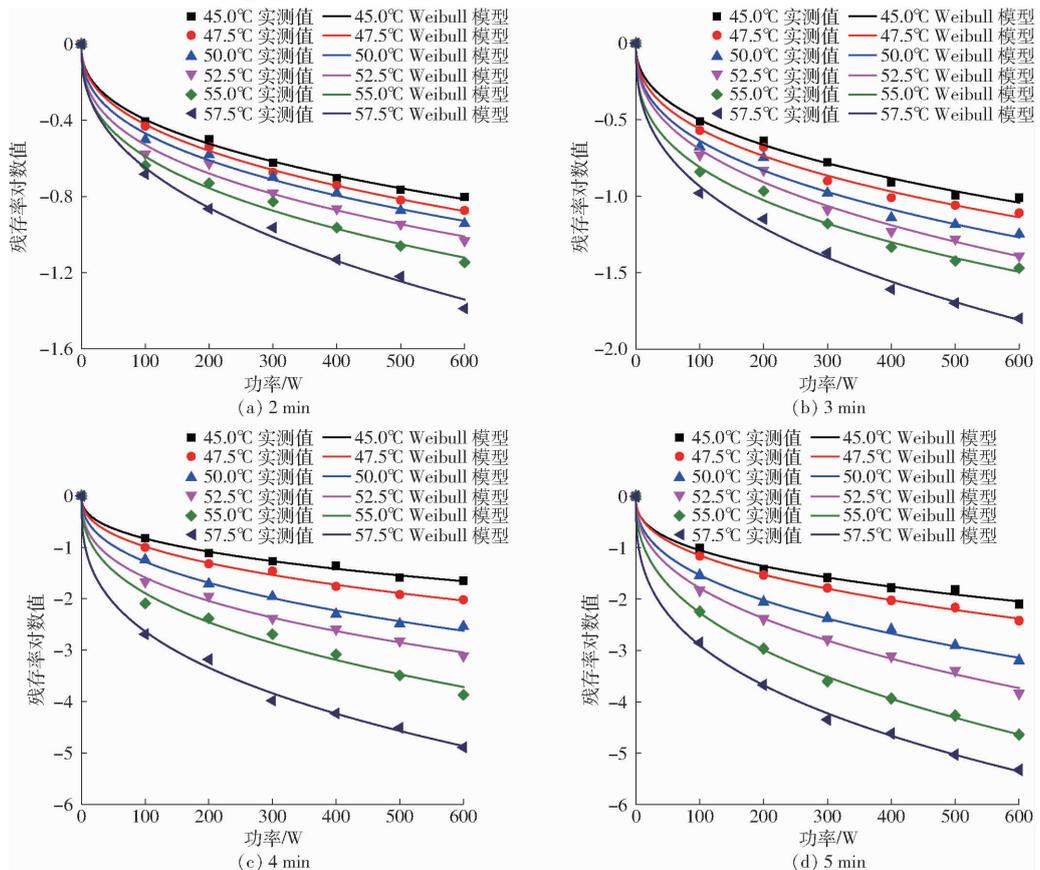


图 1 蛋清液经超声协同热处理后大肠杆菌 Weibull 模型拟合曲线

Fig. 1 Fitted curves of survival of *Escherichia coli* in egg white liquid after ultrasonic-assisted heat treatment with Weibull model

由图1可知,超声协同热处理条件对蛋清液中大肠杆菌残存率有很大的影响,随着处理功率和温度的增加,蛋清液中的大肠杆菌残存率显著降低( $P < 0.05$ ),表明超声协同热处理可有效杀灭蛋清液中的大肠杆菌。当处理时间为3 min时,温度为50.0℃,超声功率由100 W增加至600 W,大肠杆菌菌体浓度降低量由0.67 lg CFU/mL增加至1.24 lg CPU/mL,增加了0.57 lg CFU/mL;超声功率为600 W,温度由45.0℃增加至57.5℃,大肠杆菌菌体浓度降低量由1.01 lg CFU/mL增加至1.80 lg CFU/mL,增加了0.79 lg CFU/mL,并且大肠杆菌降低量在不同处理时间下变化趋势相似。由此可知,超声处理可协同增加热处理对大肠杆菌的杀菌效果,并且当温度一定时,功率越大,效果越明显。该结果与文献[23]

研究结果相一致。文献[24]已报道超声波处理可增加热处理对李斯特菌的杀菌效果,这主要是由于超声协同热处理提高了微生物对超声波的敏感性,破坏了革兰氏阴性细菌外层的细胞外膜<sup>[25-26]</sup>。因此,热处理与超声波相结合会产生协同作用破坏微生物细胞壁,加速细胞溶解,导致微生物死亡,并且功率越大,这种协同灭菌效果越好。

## 2.2 杀菌动力学分析

### 2.2.1 Weibull 模型评价参数

为探究超声协同热处理过程中大肠杆菌的死亡规律,将试验数据进行Weibull模型拟合,并计算模型拟合度评价参数 $M_{sc}$ 、 $R^2$ 、 $A_f$ ,以判断Weibull模型是否适用于拟合超声协同热处理对蛋清液中大肠杆菌杀菌动力学过程,结果如表1所示。

表1 不同超声协同热处理条件下 Weibull 模型评价参数

Tab.1 Evaluation parameters of Weibull models under different ultrasonic-assisted heats treatments

温度/℃	2 min			3 min			4 min			5 min		
	$M_{sc}$	$R^2$	$A_f$									
45.0	0.000 2	0.997	1.020	0.000 7	0.994	1.028	0.001 2	0.996	1.019	0.003 6	0.992	1.029
47.5	0.000 2	0.998	1.015	0.001 4	0.991	1.034	0.001 7	0.996	1.020	0.000 8	0.998	1.010
50.0	0.000 5	0.994	1.030	0.002 4	0.987	1.041	0.003 5	0.996	1.024	0.002 2	0.998	1.013
52.5	0.001 1	0.990	1.035	0.002 0	0.991	1.036	0.004 4	0.996	1.025	0.004 1	0.997	1.016
55.0	0.001 2	0.991	1.035	0.001 7	0.995	1.025	0.022 2	0.996	1.047	0.002 1	0.999	1.009
57.5	0.001 3	0.993	1.028	0.001 8	0.995	1.027	0.010 7	0.996	1.021	0.004 0	0.998	1.011

由表1可知, $M_{sc}$ 不大于0.022 2, $R^2$ 不小于0.987, $A_f$ 接近1,所以Weibull模型可以较好地描述超声协同热处理对蛋清液中大肠杆菌的杀菌动力学过程。目前也有其它研究证明了Weibull模型对拟合超声波协同热处理对大肠杆菌杀菌动力学过程的适用性,文献[27]研究结果表明,Weibull模型可以很好地拟合超声协同热处理对牛奶中的李斯特菌属的杀菌动力学过程。文献[28]利用

Weibull模型拟合了反丁烯二酸等化学杀菌剂联合热及超声波共同作用于豆芽中李斯特菌和大肠杆菌的杀菌动力学。

### 2.2.2 Weibull 模型拟合参数

将Weibull模型拟合得到的方程参数值结合各参数的实际意义,分析超声协同热处理条件对杀菌动力学过程的影响。不同处理条件下Weibull模型拟合参数如表2所示。

表2 不同超声协同热处理条件下 Weibull 模型拟合参数

Tab.2 Parameters of Weibull models under different ultrasonic-assisted heats treatments

温度/℃	2 min		3 min		4 min		5 min	
	$a_p$	$x$	$a_p$	$x$	$a_p$	$x$	$a_p$	$x$
45.0	999.179	0.403	542.101	0.409	162.461	0.387	87.864	0.372
47.5	826.955	0.408	432.148	0.396	103.753	0.405	70.765	0.406
50.0	728.322	0.382	322.612	0.385	54.096	0.401	34.501	0.402
52.5	583.634	0.361	255.698	0.389	28.093	0.364	24.413	0.410
55.0	436.164	0.359	185.009	0.342	18.423	0.377	12.900	0.399
57.5	290.595	0.405	110.704	0.368	5.896	0.342	4.454	0.342

尺度参数 $a_p$ 与模型形状无关,反映该种条件下的杀菌效果,即在对应的温度下,大肠杆菌降低一个对数值所需的超声功率。根据表2可知,随着温度的增加,大肠杆菌残存率降低1个对数值所需的超

声功率逐渐减少。形状参数 $x$ 则可反映致死曲线凹凸性, $x > 1$ 说明致死曲线呈凸状,模型曲线随着横坐标因素的增加呈现出降低变快的趋势; $x < 1$ 则说明致死曲线呈现凹状,模型曲线随着横坐标因素的

增加呈现降低减缓的趋势。通过表 2 可知  $x < 1$ , 说明超声协同热处理杀菌过程中, 随着超声功率的增加, 大肠杆菌残存率的降低逐渐缓慢。也有其他研究得到了相似结果, 文献 [29] 利用 Weibull 模型拟合超声处理苹果汁中大肠杆菌失活动力学过程时也得到了向下凹的大肠杆菌致死曲线。

### 2.2.3 Weibull 模型简化

为得到简化的 Weibull 模型, 分析模型参数与处理条件的相关性。由表 2 可知, 当处理时间一定时, 不同处理温度下得到的 Weibull 模型尺度参数  $a_p$  随着温度的升高而显著降低 ( $P < 0.05$ ), 表明大肠杆菌对温度的耐受性较弱, 温度越高, 大肠杆菌对超声波的敏感性越高; 形状参数  $x < 1$ , 曲线拟合均呈向下凹状, 说明随着超声波功率的增加, 超声协同热处理对蛋清液中大肠杆菌的杀菌效果增加幅度逐

渐降低。温度与超声波功率越高, 大肠杆菌越容易死亡, 该结果与致死曲线描述一致。相较于参数  $a_p$  变化的显著性, 形状参数  $x$  变化幅度较小, 数值较为集中, 若将  $x$  定为常数值, 则 Weibull 模型参数只有一个,  $a_p$  可通过线性回归求解, Weibull 则可简化,  $a_p$  值的预测也更为可靠 [30]。因此将  $x$  取平均值 0.384, Weibull 模型可简化为

$$\lg \frac{N}{N_0} = - \left( \frac{P}{a_p} \right)^{0.384} \quad (4)$$

使用简化后的模型对不同条件下超声协同热处理杀菌动力学过程重新拟合得到新的评价参数及拟合参数如表 3、图 2 所示, 可知  $M_{se}$  不大于 0.018 6,  $R^2 > 0.970$ ,  $A_f$  接近于 1, 与原参数值相比, 评价参数没有显著变化, 模型拟合度较好, 说明简化后的模型是合理的。

表 3 简化后 Weibull 模型评价参数

Tab. 3 Evaluation parameters of simplified Weibull models

温度/°C	2 min			3 min			4 min			5 min		
	$M_{se}$	$R^2$	$A_f$									
45.0	0.000 2	0.997	1.017	0.000 7	0.994	1.077	0.001 0	0.997	1.019	0.003 1	0.994	1.028
47.5	0.000 2	0.998	1.017	0.001 1	0.992	1.066	0.001 7	0.996	1.019	0.001 1	0.998	1.015
50.0	0.000 4	0.996	1.030	0.002 0	0.989	1.085	0.003 2	0.996	1.026	0.002 3	0.998	1.015
52.5	0.001 0	0.991	1.036	0.001 7	0.993	1.074	0.004 3	0.996	1.028	0.004 9	0.997	1.019
55.0	0.001 1	0.992	1.034	0.001 7	0.993	1.077	0.018 6	0.988	1.046	0.002 6	0.998	1.014
57.5	0.001 1	0.974	1.025	0.001 7	0.996	1.075	0.015 8	0.994	1.032	0.011 8	0.996	1.025

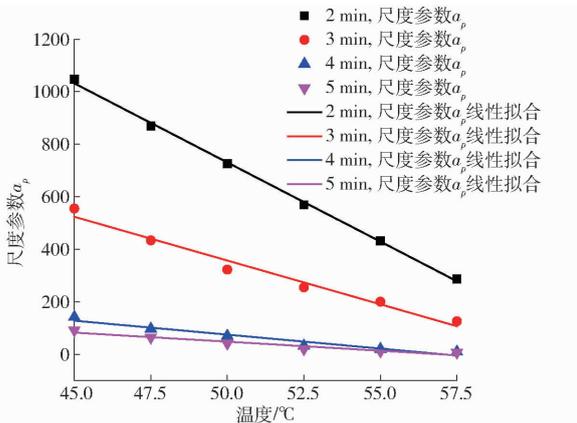


图 2 简化后 Weibull 模型尺度参数  $a_p$  及其与温度的线性拟合

Fig. 2  $a_p$  of simplified Weibull models and linear fitting between  $a_p$  and temperature

### 2.2.4 超声功率-温度-时间 Weibull 模型的建立

对图 2 分析可知, 当处理时间相同时,  $a_p$  随着温度的增加而降低, 参数  $a_p$  与温度呈负相关, 参数  $a_p$  与温度  $T$  的关系可用线性关系描述 ( $a_p = kT + b$ ) [31], 以温度为横坐标、 $a_p$  为纵坐标进行线性拟合, 可得到不同处理时间条件下, 决定  $a_p$  与温度关系对应的线性拟合参数  $k$ 、 $b$  值, 如表 4 所示。

表 4 线性拟合  $a_p$  与温度关系的方程参数及  $R^2$

Tab. 4 Linear fitting equation parameters and  $R^2$  of relationship between  $a_p$  and temperature

时间/min	线性拟合方程参数		$R^2$
	$k$	$b$	
2	-60.273	3743.990	0.998
3	-33.331	2023.441	0.976
4	-10.628	606.137	0.947
5	-6.894	392.605	0.933

由表 4 可知,  $a_p$  与温度线性拟合的决定系数  $R^2 > 0.930$ , 说明线性拟合较好。同一超声功率与温度条件下, 随着处理时间的增加,  $k$  逐渐增加,  $b$  逐渐降低。  $a_p$  反映杀菌效果, 微生物热致死时间随杀菌温度的提高而呈指数关系缩短, 即微生物杀菌效果随温度的升高指数增加, 微生物的杀菌效果随时间的增加呈指数关系递减, 同时为避免参数  $k$ 、 $b$  预测值正负号的改变, 故将参数  $-k$ 、 $b$  与时间  $t$  进行指数方程拟合, 如图 3、4 所示。

$-k$ 、 $b$  分别与时间进行指数拟合可得到方程如图 3、4 所示,  $R^2 > 0.960$  说明模型拟合度较好。通

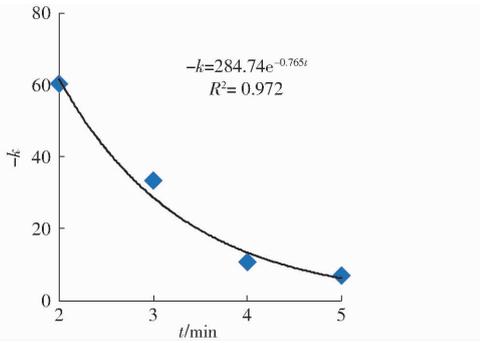


图3 处理时间对参数 $-k$ 的影响及指数拟合  
Fig. 3 Effect of processing time on  $-k$  value and exponential fitting between  $-k$  and  $t$

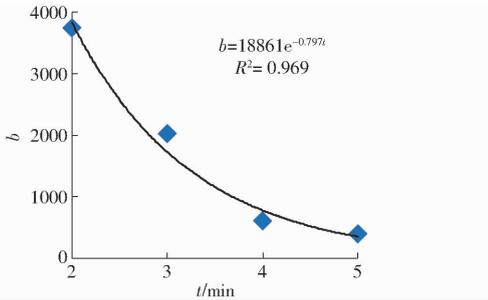


图4 处理时间对参数 $b$ 的影响及指数拟合  
Fig. 4 Effect of processing time on  $b$  value and exponential fitting between  $b$  and  $t$

过整理可得到 $a_p$ 与温度 $T$ 、时间 $t$ 的关系模型为

$$a_p = -284.74e^{-0.765t}T + 18861e^{-0.797t} \quad (5)$$

将式(5)代入式(4),可得到大肠杆菌残存率对数值 $\lg(N/N_0)$ 、超声功率 $P$ 、温度 $T$ 、时间 $t$ 的关系模型为

$$\lg \frac{N}{N_0} = - \left( \frac{P}{-284.74e^{-0.765t}T + 18861e^{-0.797t}} \right)^{0.384} \quad (6)$$

该模型参数包含了 $P$ 、 $T$ 、 $t$ 共3个参数,理论上可以使用该模型定量说明超声结合热处理在特定的超声功率、温度和时间组合下对大肠杆菌的杀菌效果。

### 2.2.5 模型评价

为评价模型预测值与实际值的一致性,验证该模型是否能够准确预测超声协同热处理对蛋清液中大肠杆菌的杀菌效果,以试验所得大肠杆菌残存率实测对数值为横坐标,模型残存率预测对数值为纵坐标进行线性拟合,结果如图5所示。

一般情况下,线性拟合的决定系数 $R^2$ 可判断预测值与实际值差异性,实测值与预测值一致性越好,线性拟合方程斜率越接近于1,截距则越趋近于0<sup>[32]</sup>。通过图5中线性拟合方程可知,斜率为0.9684,接近于1,截距为0.0113,接近于0,说明预测值与实际值之间相差不大,并且 $R^2 = 0.951 > 0.950$ ,表

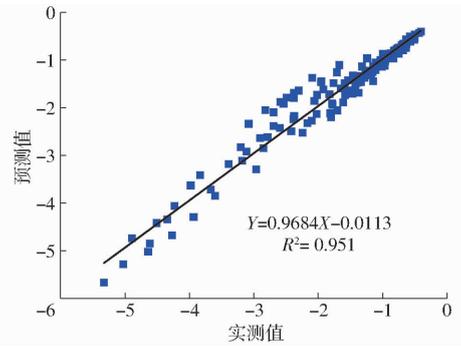


图5 超声结合热处理对蛋清液中大肠杆菌残存率  
实测值与预测值比较曲线  
Fig. 5 Correlation between observed and predicted data for survival rate of *Escherichia coli* in egg white liquid by ultrasonic-assisted heats treatment

明模型拟合度较好,因此得到的超声功率-温度-时间 Weibull 模型可应用于预测超声协同热处理对蛋清液中大肠杆菌的杀菌动力学过程。

## 2.3 超声协同热处理对蛋清液功能性质的影响

### 2.3.1 粘度

蛋清液在食品生产加工中应用广泛,粘度是影响其应用的重要性质,因此分析了超声协同热处理对粘度的影响。以热处理组为对照(超声功率为0 W),研究不同条件对蛋清液粘度的影响,结果如图6所示。

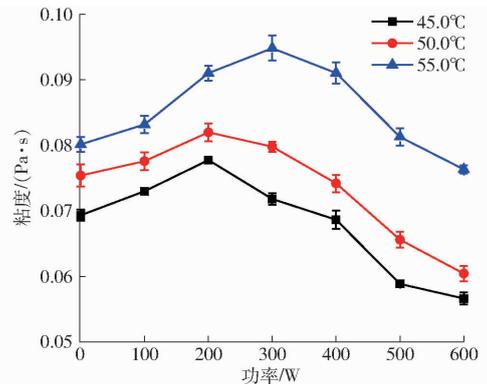


图6 超声协同热处理3 min对蛋清液粘度的影响  
Fig. 6 Effect of ultrasonic-assisted heats treatment for 3 min on egg white liquid viscosity

在同一温度下,随着超声波功率的增加,蛋清液的粘度呈现先增加后降低的变化趋势,当热处理温度为45.0、50.0℃,超声功率为200 W时蛋清液粘度达到最大值0.077、0.082 Pa·s。而当温度为55.0℃,超声功率为300 W时粘度达到最大值,为0.095 Pa·s。之后随着超声功率的增加,粘度开始逐渐降低,并且在超声功率为600 W时,粘度低于对照组。因此可知,低强度的超声协同热处理可增加蛋清液粘度,高强度超声作用则导致相反结果。其原

因可能是低强度的超声处理会使蛋清液体系更加分散, 溶液中蛋白质分布更加均一, 空隙变小, 内摩擦力增加, 导致整个体系粘度增加。而高强度超声波破坏了蛋白质分子间肽链, 使得蛋白分子表面亲水、疏水基团增加, 导致粘度下降<sup>[33]</sup>。

### 2.3.2 凝胶性

凝胶性作为重要的功能性质之一, 影响着蛋清液在食品加工中的应用。以热处理组为对照, 研究不同条件的超声协同热处理对蛋清液凝胶性的影响, 结果如表 5 所示。

表 5 超声协同热处理 3 min 对蛋清液凝胶性的影响

Tab. 5 Effect of ultrasonic-assisted heats treatment for 3 min on egg white liquid gel properties

温度/℃	功率/W	硬度/g	咀嚼性指数	黏附性指数/(g·s)	弹性指数	回复性指数	内聚性指数
45.0	0	(790.10 ± 26.94) <sup>a</sup>	(651.66 ± 18.77) <sup>a</sup>	(103.30 ± 0.84) <sup>a</sup>	(0.64 ± 0.01) <sup>b</sup>	(0.57 ± 0.01) <sup>bc</sup>	(0.71 ± 0.01) <sup>a</sup>
	100	(1208.47 ± 33.67) <sup>b</sup>	(788.13 ± 10.22) <sup>b</sup>	(106.27 ± 1.91) <sup>c</sup>	(0.73 ± 0.01) <sup>d</sup>	(0.58 ± 0.01) <sup>bc</sup>	(0.77 ± 0.01) <sup>c</sup>
	200	(1435.34 ± 32.87) <sup>c</sup>	(963.29 ± 20.94) <sup>c</sup>	(128.83 ± 5.37) <sup>d</sup>	(0.88 ± 0.01) <sup>f</sup>	(0.59 ± 0.01) <sup>cd</sup>	(0.80 ± 0.01) <sup>d</sup>
	300	(1689.24 ± 48.96) <sup>d</sup>	(1105.75 ± 29.32) <sup>d</sup>	(135.33 ± 1.02) <sup>e</sup>	(0.76 ± 0.01) <sup>e</sup>	(0.60 ± 0.01) <sup>d</sup>	(0.82 ± 0.01) <sup>e</sup>
	400	(1471.23 ± 34.45) <sup>c</sup>	(1089.40 ± 35.17) <sup>c</sup>	(130.92 ± 2.44) <sup>e</sup>	(0.69 ± 0.01) <sup>c</sup>	(0.57 ± 0.01) <sup>b</sup>	(0.71 ± 0.01) <sup>a</sup>
	500	(780.21 ± 17.22) <sup>a</sup>	(708.93 ± 23.30) <sup>a</sup>	(107.53 ± 6.11) <sup>b</sup>	(0.58 ± 0.01) <sup>a</sup>	(0.59 ± 0.01) <sup>cd</sup>	(0.80 ± 0.01) <sup>d</sup>
50.0	0	(922.42 ± 22.62) <sup>a</sup>	(741.00 ± 9.66) <sup>a</sup>	(118.00 ± 2.65) <sup>a</sup>	(0.86 ± 0.01) <sup>e</sup>	(0.52 ± 0.01) <sup>a</sup>	(0.77 ± 0.01) <sup>ab</sup>
	100	(1341.82 ± 19.03) <sup>c</sup>	(807.94 ± 26.41) <sup>b</sup>	(127.69 ± 1.34) <sup>b</sup>	(0.84 ± 0.01) <sup>d</sup>	(0.51 ± 0.01) <sup>a</sup>	(0.76 ± 0.01) <sup>a</sup>
	200	(1635.70 ± 27.25) <sup>d</sup>	(1028.10 ± 25.66) <sup>c</sup>	(151.48 ± 2.99) <sup>c</sup>	(0.78 ± 0.02) <sup>b</sup>	(0.51 ± 0.01) <sup>a</sup>	(0.79 ± 0.01) <sup>c</sup>
	300	(2337.43 ± 47.86) <sup>f</sup>	(1572.40 ± 47.04) <sup>d</sup>	(162.34 ± 2.51) <sup>f</sup>	(0.83 ± 0.02) <sup>cd</sup>	(0.52 ± 0.01) <sup>a</sup>	(0.80 ± 0.01) <sup>c</sup>
	400	(1965.29 ± 43.92) <sup>d</sup>	(1277.13 ± 29.66) <sup>f</sup>	(154.41 ± 0.17) <sup>e</sup>	(0.75 ± 0.01) <sup>a</sup>	(0.56 ± 0.01) <sup>b</sup>	(0.84 ± 0.01) <sup>d</sup>
	500	(1269.63 ± 29.65) <sup>b</sup>	(1088.26 ± 15.80) <sup>d</sup>	(129.11 ± 2.62) <sup>d</sup>	(0.85 ± 0.02) <sup>de</sup>	(0.59 ± 0.01) <sup>c</sup>	(0.84 ± 0.01) <sup>d</sup>
55.0	0	(904.43 ± 15.19) <sup>a</sup>	(804.24 ± 8.67) <sup>e</sup>	(120.98 ± 2.38) <sup>b</sup>	(0.81 ± 0.01) <sup>c</sup>	(0.52 ± 0.01) <sup>a</sup>	(0.78 ± 0.02) <sup>abc</sup>
	100	(1040.67 ± 14.78) <sup>b</sup>	(1004.17 ± 24.83) <sup>bc</sup>	(128.71 ± 0.37) <sup>c</sup>	(0.90 ± 0.01) <sup>c</sup>	(0.51 ± 0.02) <sup>b</sup>	(0.76 ± 0.01) <sup>b</sup>
	100	(1555.41 ± 33.10) <sup>c</sup>	(1030.45 ± 27.74) <sup>c</sup>	(143.34 ± 2.91) <sup>d</sup>	(0.82 ± 0.01) <sup>ab</sup>	(0.48 ± 0.01) <sup>ab</sup>	(0.74 ± 0.01) <sup>a</sup>
	200	(1911.99 ± 19.07) <sup>d</sup>	(1259.51 ± 34.13) <sup>d</sup>	(160.63 ± 1.81) <sup>f</sup>	(0.92 ± 0.01) <sup>bc</sup>	(0.50 ± 0.01) <sup>bc</sup>	(0.80 ± 0.01) <sup>c</sup>
	300	(2092.18 ± 61.72) <sup>e</sup>	(1997.11 ± 43.87) <sup>e</sup>	(171.26 ± 0.90) <sup>g</sup>	(0.94 ± 0.02) <sup>a</sup>	(0.47 ± 0.01) <sup>a</sup>	(0.75 ± 0.01) <sup>ab</sup>
	400	(1535.64 ± 32.18) <sup>c</sup>	(1062.94 ± 39.58) <sup>c</sup>	(146.78 ± 0.80) <sup>e</sup>	(0.89 ± 0.01) <sup>d</sup>	(0.56 ± 0.01) <sup>d</sup>	(0.82 ± 0.01) <sup>d</sup>
500	(1063.48 ± 17.17) <sup>b</sup>	(955.88 ± 23.52) <sup>b</sup>	(116.54 ± 0.86) <sup>a</sup>	(0.82 ± 0.01) <sup>bc</sup>	(0.50 ± 0.01) <sup>bc</sup>	(0.76 ± 0.01) <sup>ab</sup>	
600	(925.16 ± 24.56) <sup>a</sup>	(875.81 ± 29.99) <sup>a</sup>	(124.01 ± 2.00) <sup>b</sup>	(0.85 ± 0.01) <sup>a</sup>	(0.47 ± 0.01) <sup>a</sup>	(0.75 ± 0.01) <sup>ab</sup>	

注: 同列不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

由表 5 可知, 与对照组相比, 超声协同热处理可明显改善蛋清液的凝胶特性 ( $P < 0.05$ ), 在同一温度下, 随着超声功率的增加, 蛋清液凝胶的硬度、咀嚼性指数、黏附性指数、弹性指数、回复性指数和内聚性指数总体均呈现出先增加后降低的趋势, 这与粘度变化相一致。当超声功率为 300 W 时, 这种影响最为显著, 当温度为 55.0℃, 超声功率为 300 W 时凝胶硬度达到 (2092.18 ± 61.72) g, 与对照组相比提高了 101.04%。这与文献[33]的结果相一致。其原因是, 超声的空穴作用导致蛋白质发生碰撞或相互作用, 并且蛋清液属于混合蛋白源, 组成复杂, 不同蛋白质对超声功率的敏感性不同, 在部分蛋白质发生折叠或聚集时, 可能有部分蛋白质发生一定的裂解。当超声功率低于 300 W 时, 适当的超声处理使部分蛋白质分子间或分子内产生了一定的交联反应, 蛋白质分子之间发生了一定的折叠或聚集现象, 蛋白质聚集体相对分子质量增加, 暴露在溶液中游离巯基含量减少, 二硫键增多, 分子间产生交联的

机会增加, 致使形成的凝胶空间网络更加致密、均一, 凝胶性随之增加。当功率大于 300 W 时, 随着超声功率的增加, 蛋清液中部分蛋白质又逐渐展开, 又发生了一定程度的降解, 所以凝胶性开始下降。

### 2.3.3 起泡性

蛋清液因其良好的起泡性还被广泛应用于焙烤制品、冷饮制品等食品中<sup>[34]</sup>。本文以热处理组为对照, 研究不同条件超声协同热处理对蛋清液的起泡力及泡沫稳定性的影响, 结果如图 7(图中同一温度下不同字母表示差异显著,  $P < 0.05$ ) 所示。

由图 7 可知, 同一温度下, 随着超声功率的增加, 蛋清液的起泡力总体呈先增加后降低趋势, 并且当功率大于 300 W 时, 随着功率的增加, 起泡力变化较小。相较于对照组, 超声协同热处理可以显著增加蛋清液的起泡力 ( $P < 0.05$ ), 当温度为 55.0℃, 超声功率为 300 W 时, 起泡力较对照组提高了 50%。其原因可能是适当强度的超声作用使蛋清液体系分散, 蛋白质分子间接触程度增加, 相互作用增加, 这

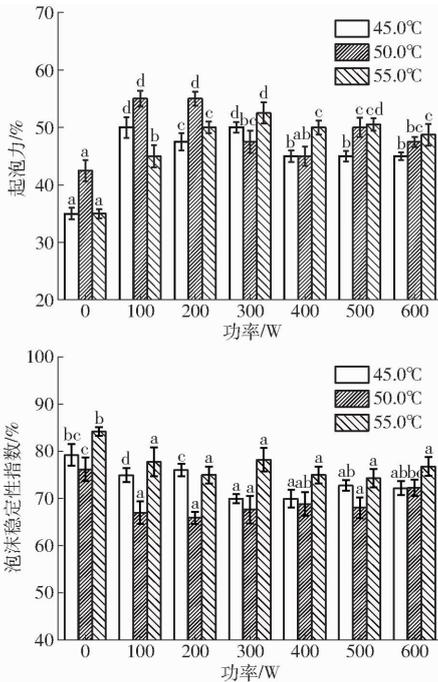


图7 超声协同热处理3 min对蛋清液起泡力及泡沫稳定性的影响

Fig.7 Effect of ultrasonic-assisted heats treatment for 3 min on egg white liquid foam capacity and foam stability

有助于降低表面张力而促进水-空气界面的形成,促使蛋白质起泡力增加<sup>[35-36]</sup>。也有其它研究证明了超声处理是提高食品蛋白质起泡力的有效方法,文献<sup>[37]</sup>研究了超声处理对大豆分离蛋白起泡力的影响,发现大豆蛋白经超声处理5 min后,起泡力较

未处理组提高了62%。

同时,由图7可知,与对照组相比,超声协同热处理会显著降低其泡沫稳定性( $P < 0.05$ )。但不同超声功率处理对蛋清液泡沫稳定性影响不显著。蛋清液受超声空化作用和机械作用影响,体系更为分散,粘度的降低使蛋白质分子间无法形成稳定的网状结构,导致泡沫稳定性下降,该结果与文献<sup>[15]</sup>结论相一致。

### 3 结束语

研究了超声协同热处理对蛋清液中大肠杆菌的杀菌动力学过程,同时揭示了该种处理方法对蛋清液功能性质的影响。研究表明,相较于目前食品工业普遍采用的热杀菌技术,超声波的加入可明显提高蛋清液的杀菌效果,温度越高,功率越大,协同杀菌效果越好。应用Weibull模型能够较好地模拟其杀菌动力学过程,并且可以简化为大肠杆菌残存率对数值对超声功率-温度-时间变化的模型方程,简化后的Weibull模型决定系数 $R^2 > 0.950$ ,表明该模型可较好地预测超声协同热处理的杀菌动力学过程。同时,该种杀菌方法在一定程度上可改善蛋清液凝胶性、起泡性等功能性质,当超声功率为300 W时,这种改善效果最佳。因此,超声协同热处理可作为一种潜在的杀菌技术应用于蛋清液杀菌,为延长蛋清液保质期、同时改善蛋清液功能性质提供一定参考。

### 参 考 文 献

- [1] 迟玉杰. 蛋制品加工技术[M]. 2版. 北京: 中国轻工业出版社, 2018: 21-25.
- [2] GABRIEL A A, VERA D D, LAZO O M Y, et al. Ultraviolet-C inactivation of *Escherichia coli* O157:H7, *Listeria monocytogenes*, *Pseudomonas aeruginosa*, and *Salmonella enterica* in liquid egg white [J]. *Food Control*, 2016, 73: 1303-1309.
- [3] 徐珍珍. 蛋清蛋黄复配液的功能性质及其应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2013.  
XU Zhenzhen. Functional properties and applications of reconstituted liquid egg with egg white and yolk [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013. (in Chinese)
- [4] 迟玉杰, 赵英, 迟媛, 等. 一种长保质期的高起泡性蛋清液的制备方法: 201810223896.8 [P]. 2018-09-04.
- [5] 刘丽艳, 张喜梅, 李琳, 等. 超声波杀菌技术在食品中的应用[J]. *食品科学*, 2006, 27(12): 778-780.  
LIU Liyan, ZHANG Ximei, LI Lin, et al. Application of ultrasound sterilization technique in food industry [J]. *Food Science*, 2006, 27(12): 778-780. (in Chinese)
- [6] PIYASENA P, MOHAREB E, MCKELLAR R C. Inactivation of microbes using ultrasound; a review [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2003, 87(3): 207-216.
- [7] STEFANOVIĆ A B, JOVANOVIĆ J R, DOJČINOVIĆ M B, et al. Effect of the controlled high-intensity ultrasound on improving functionality and structural changes of egg white proteins [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2017, 10(7): 1224-1239.
- [8] YAO Z, KRANTHI V S, JIN W, et al. Effects of ultrasonic and microwave processing on avidin assay and secondary structures of egg white protein [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2018, 11: 1974-1984.
- [9] KODA S, MIYAMOTO M, TOMA M, et al. Inactivation of *Escherichia coli* and *Streptococcus mutans* by ultrasound at 500 kHz [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2009, 16(5): 655-659.
- [10] ORDOÑEZ J A, SANZ B, HERNANDEZ P E, et al. A note on the effect of combined ultrasonic and heat treatments on the survival of thermophilic streptococci [J]. *Journal of Applied Bacteriology*, 2010, 56(1): 175-177.
- [11] HU H, WU J, LI-CHAN E C Y, et al. Effects of ultrasound on structural and physical properties of soy protein isolate (SPI) dispersions [J]. *Food Hydrocolloids*, 2013, 30(2): 647-655.
- [12] KNORR D, ZENKER M, HEINZ V, et al. Applications and potential of ultrasonics in food processing [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2004, 15(5): 261-266.
- [13] LEE D U, HEINZ V, KNORR D. Effects of combination treatments of nisin and high-intensity ultrasound with high pressure on the microbial inactivation in liquid whole egg [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2003, 4(4): 387-393.

- [14] 张秋婷, 林素丽, 朱松明, 等. 超高压与微酸性电解水结合对鲜切果蔬的杀菌效果研究[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(3):338-344.  
ZHANG Qiuting, LIN Suli, ZHU Songming, et al. Combined effect of high pressure and slightly acidic electrolyzed water on sterilization of fresh-cut fruits and vegetables [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3):338-344. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170343&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170343&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.043. (in Chinese)
- [15] 李弓中, 赵英, 王俊彤, 等. 超声处理对蛋清蛋白结构性质及蛋清液起泡性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(9):68-75.  
LI Gongzhong, ZHAO Ying, WANG Juntong, et al. Effects of protein structure properties and foaming properties of egg white liquid under ultrasonic treatment [J]. Food Science, 2019, 40(9):68-75. (in Chinese)
- [16] 中华人民共和国卫生部. GB 4789.38—2012 食品微生物学检验 大肠埃希氏菌计数[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [17] MAFART P, COUVERT O, GAILLARD S, et al. On calculating sterility in thermal preservation methods: application of the Weibull frequency distribution model [J]. International Journal of Food Microbiology, 2002, 72(1):107-113.
- [18] 关云静, 周林燕, 毕金峰, 等. 高压均质对芒果汁中大肠杆菌的杀菌动力学[J]. 食品科学, 2017, 38(10):229-235.  
GUAN Yunjing, ZHOU Linyan, BI Jinfeng, et al. Inactivation kinetics of *Escherichia coli* in mango juice by high pressure homogenization [J]. Food Science, 2017, 38(10):229-235. (in Chinese)
- [19] 周良付, 雷玉洁, 李宇坤, 等. 多酚氧化酶的射频加热灭活效果及动力学分析[J]. 现代食品科技, 2016, 32(9):161-166.  
ZHOU Liangfu, LEI Yujie, LI Yukun, et al. Inactivation effect of radio frequency heating on polyphenol oxidase and the analysis of kinetics [J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(9):161-166. (in Chinese)
- [20] PATRIGNANI F, VANNINI L, SADO KAMDEM S L, et al. High pressure homogenization vs heat treatment: safety and functional properties of liquid whole egg [J]. Food Microbiology, 2013, 36(1):63-69.
- [21] MOHAMMADI N A, TABATABAEI R H, PASHANIA B, et al. Effects of ascorbic acid and sugars on solubility, thermal, and mechanical properties of egg white protein gels [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2013, 62:397-404.
- [22] CHURCH F C, SWAISGOOD H E, PORTER D H, et al. Spectrophotometric assay using o-phthaldialdehyde for determination of proteolysis in milk and isolated milk proteins [J]. Journal of Dairy Science, 1983, 66(6):1219-1227.
- [23] 林伟, 丁甜, 刘东红, 等. 声热复合对沙门氏菌的杀菌效果研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(7):79-84.  
LIN Yi, DING Tian, LIU Donghong, et al. Sterilization effects of thermos-sonication treatment on *Salmonella* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(7):79-84. (in Chinese)
- [24] UGARTE-ROMERO E, FENG H, MARTIN S E. Inactivation of *Shigella boydii* 18 IDPH and *Listeria monocytogenes* Scott A with power ultrasound at different acoustic energy densities and temperatures [J]. Journal of Food Science, 2007, 72(4):103-107.
- [25] CONDÓN S, RASO J, PAGÁN R, et al. Microbial inactivation by ultrasound [M]//BARBOSA-CANOVAS G V, TAPIA M S, CANO M P. Novel food processing techniques. Florida: CRC Press LLC, 2005:423-442.
- [26] VALERO M, RECROSIO N, SAURA D, et al. Effects of ultrasonic treatments in orange juice processing [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(2):509-516.
- [27] BERMÚDEZ-AGUIRRE D, CORRADINI M G, MAWSON R, et al. Modeling the inactivation of *Listeria innocua* in raw whole milk treated under thermo-sonication [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2009, 10(2):172-178.
- [28] NGNITCHO P F K, TANGO C N, KHAN I, et al. The applicability of Weibull model for the kinetics inactivation of *Listeria monocytogenes* and *Escherichia coli* O157:H7, on soybean sprouts submitted to chemical sanitizers in combination with ultrasound at mild temperatures [J]. Food Science and Technology, 2018, 91:573-579.
- [29] EDGAR U R, FENG H, MARTIN S E, et al. Inactivation of *Escherichia coli* with power ultrasound in apple cider [J]. Journal of Food Science, 2006, 71(2):102-108.
- [30] 靳志强, 王顺喜, 韩培. 微波杀灭霉变玉米中寄生曲霉动力学模型[J]. 农业机械学报, 2011, 42(12):148-153, 170.  
JIN Zhiqiang, WANG Shunxi, HAN Pei. Inactivation kinetics model of *Aspergillus parasiticus* mouldy maize by microwave processing [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(12):148-153, 170. (in Chinese)
- [31] SERMENT-MORENO V, BARBOSA-CANOVAS G, TORRES J A, et al. High-pressure processing: kinetic models for microbial and enzyme inactivation [J]. Food Engineering Reviews, 2014, 6(3):56-88.
- [32] 雷玉洁, 周良付, 李宇坤, 等. 大肠杆菌射频加热杀菌效果及动力学模型拟合[J]. 中国食品学报, 2018, 18(4):132-138.  
LEI Yujie, ZHOU Liangfu, LI Yukun, et al. Inactivation effect and inactivation kinetics of *Escherichia coli* by radio frequency heating [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018, 18(4):132-138. (in Chinese)
- [33] 叶钰, 高金燕, 陈红兵, 等. 超声波加工对蛋清蛋白质结构和凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(21):52-59.  
YE Yu, GAO Jinyan, CHEN Hongbing, et al. Effect of ultrasonic processing on protein structure and gel properties of egg white [J]. Food Science, 2018, 39(21):52-59. (in Chinese)
- [34] 迟玉杰, 赵英, 毋引子. 鸡蛋蛋清液起泡性的研究[J]. 中国家禽, 2017, 39(3):1-5.  
CHI Yujie, ZHAO Ying, WU Yinzi. The study of foaming property of egg white [J]. China Poultry, 2017, 39(3):1-5. (in Chinese)
- [35] 朱晶. 超声—辐照联用技术提高蛋清液起泡性方法探究及影响机理初探[D]. 长春: 吉林大学, 2018.  
ZHU Jing. Effect of ultrasonic-irradiation treatment on foaming properties of liquid egg white and exploration of its action mechanism [D]. Changcun: Jilin University, 2018. (in Chinese)
- [36] 贾俊强, 马海乐, 赵伟睿, 等. 超声波处理对小麦胚芽球蛋白理化和功能性质的影响[J]. 农业机械学报, 2009, 40(8):105-110.  
JIA Junqiang, MA Haile, ZHAO Weirui, et al. Effect of ultrasound treatment on physicochemical and functional properties of wheat germ globulin [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8):105-110. (in Chinese)
- [37] MORALES R, MARTÍNEZ K D, RUIZ-HENESTROSA V M P, et al. Modification of foaming properties of soy protein isolate by high ultrasound intensity: particle size effect [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 26:48-55.