

射频结合热水浴对接种大肠杆菌酸木瓜的杀菌动力学

尹毅豪^{1,2,3}, 孙守清云^{1,2,3}, 郭超凡^{1,2,3*}, 宋子波^{5,6}, 胡小松^{1,4}, 易俊洁^{1,2,3,6}

¹昆明理工大学食品科学与工程学院 昆明 650500)

²云南省特色果蔬健康产品工程研究中心 昆明 650500)

³昆明市绿色食品加工国际科技研发中心 昆明 650500)

⁴中国农业大学食品科学与营养工程学院 北京 100083)

⁵云南省特色林果应用技术重点实验室 云南玉溪 653100)

⁶云南猫哆哩集团食品有限责任公司 云南玉溪 653100)

摘要 水浴巴氏杀菌技术由于传热较慢,在杀菌过程中易导致鲜切酸木瓜果片过度热加工,果片的风味品质严重劣变。射频结合热水浴杀菌技术通过对物料进行体积式加热,提高了加热效率与加热均匀性,从而减少了微生物的耐热性与杀菌时间,能够有效减少热传导过程对果片中风味、营养、颜色等热敏性成分的影响。本研究选取大肠杆菌为目标菌株,探究不同射频极板间距对接种大肠杆菌酸木瓜果片的升温特性以及杀菌效率的影响,使用 Linear、Weibull、Log-logistic 模型对射频结合热水浴杀菌动力学进行拟合。结果表明,相较于水浴巴氏杀菌,在 100 mm 极板间距下,射频结合水浴加热减少了约 46% 的升温时间和 57% 的杀菌时间(致死对数>5 lg)。比较杀菌动力学模型的拟合评价参数 Af、Bf、RMSE 和 R²,其中 Log-logistic 模型的拟合效果最好(Af:1.0884;Bf:0.9334;RMSE:0.1189;R²:0.9931),模型预测值与实测值趋势相近,能较准确显示大肠杆菌在射频结合热水浴加热下的失活规律,说明射频结合热水浴杀菌是一种能有效杀灭鲜切酸木瓜果片中大肠杆菌的杀菌方法。

关键词 鲜切果片; 射频杀菌; 大肠杆菌; 杀菌动力学; 模型拟合

文章编号 1009-7848(2024)12-0267-10 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.12.024

酸木瓜(*Chaenomeles sinensis*)属蔷薇科木瓜属植物,主要分布在我国云南、山东、四川、江西、安徽、湖北、江苏、浙江、广西和广东等地,已成为我国罕见的集观赏、食用、保健、药用等功能于一体的果实,具有很大的开发利用价值,目前围绕酸木瓜已经开发了果汁^[1]、果酒^[2]、木瓜粉^[3]等一系列产品。在云南地区,酸木瓜主要以鲜食为主,鲜切酸木瓜片能最大限度地保留酸木瓜中酸、涩的口感及其特殊的清香风味,不仅满足了消费者对于方便、健康食品的需求,还可以作为预制菜中重要的果酸原料来源,具有巨大的消费市场需求。酸木瓜片为一种高酸性食品(pH<4.6),在加工过程中原材料采收、加工环境等存在大肠杆菌 O157:H7 污染的风险,从而造成食品安全问题^[4-5]。可使用巴

氏杀菌灭活产品中的大肠杆菌,减少食源性疾病风险,保证食品安全^[6-7]。传统热杀菌技术具有良好的杀菌效果,然而加热时间过长,容易导致产品的风味品质损失严重,需研究新型杀菌方式作为传统热杀菌的替代方案,对提高酸木瓜鲜果切片的产品品质十分重要^[8]。

射频与微波相似,是一种电磁波,其频率范围为 3 kHz 至 300 MHz,只有 13.56,27.12,40.68 MHz 的频率可用于工业、科研及医疗应用^[9]。射频通过产生快速变换方向的交变电场驱动样品中的偶极子极化和离子迁移产生热量^[9]。相较于传统热杀菌技术,射频技术具有穿透深度大、体积加热、加热速率高等优势,被认为是传统热杀菌的可替代技术,已应用于鲜果产品的灭菌^[10]、灭虫^[11]和漂烫^[12]等。射频杀菌技术仍然存在加热不均匀的情况,可能造成食品中冷点处杀菌不彻底,从而引发微生物超标等问题^[13]。将射频与热水浴相结合进行杀菌,不仅可进一步缩短加热时间,还可通过热水浴的传热提高加热均匀性,较好地保证杀菌

收稿日期: 2023-12-19

基金项目: 云南省重大专项(202102AE090050);云南省重大研发专项课题(202102AE090024-04)

第一作者: 尹毅豪,男,硕士

通信作者: 郭超凡 E-mail: guochaofanfan@outlook.com

效果,保持食品的风味品质^[14-15]。

微生物杀菌动力学对于杀菌技术应用具有重要的意义,在确定准确的杀菌动力学数学模型后,可根据该模型推算在一定加热条件下使微生物减少所需的加热时间,再根据该加热时间推算出微生物的热致死温度。目前,研究人员已建立多种微生物在射频加热下的失活动力学模型。Hu等^[16]研究表明 Weibull 模型能够拟合射频加热下沙门氏菌的失活曲线。Jiao等^[17]研究表明射频加热下蜡芽孢杆菌孢子的失活动力学符合 Weibull 模型。Gao等^[18]研究表明射频加热下曲霉的失活曲线相较一级动力学模型更符合 Weibull 模型。而射频结合热水浴杀灭鲜切果片中大肠杆菌的研究较少,其动力学模型尚未见报道。本试验选择大肠杆菌 ATCC 25922 为目标菌种,是因为其具有与大肠杆菌 O157:H7 相似的热灭活动力学,且不具有致病性^[19]。通过接种大肠杆菌 ATCC 25922 的酸木瓜鲜果切片,探究不同极板间距对射频结合热水浴加热及杀菌的影响。采用不同数学模型拟合射频结合热水浴加热,研究大肠杆菌的失活动力学,为该技术的应用提供参考。

1 材料与方法

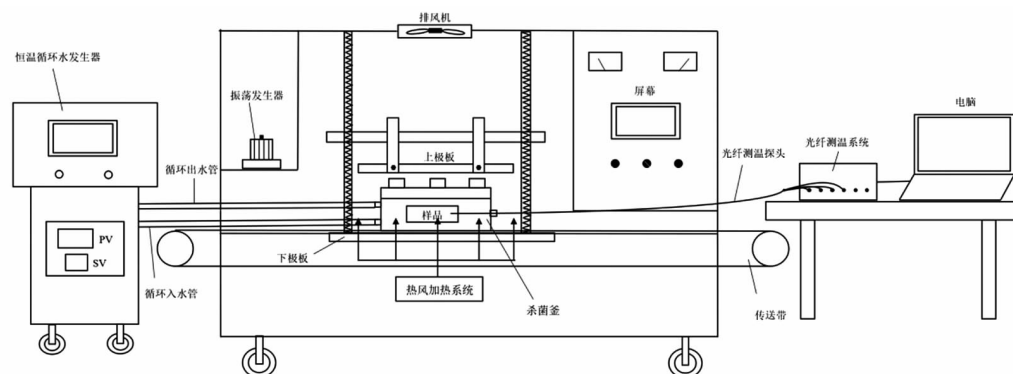


图1 射频加热杀菌装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of RF heating system

1.2.2 其它仪器与设备 SW-CJ-2FD 超净工作台,苏洁医疗器械(苏州)有限公司;LDZM-80L 立式高压蒸汽灭菌器,上海申安医疗器械厂;Stab MiniH 振荡培养箱,上海润度生物科技有限公司;HPX-9162MBE 电热恒温培养箱,上海博迅实业

1.1 菌株、材料与试剂

大肠杆菌 (*Escherichia coli*) ATCC 25922, 中国工业微生物菌种保藏管理中心。

胰蛋白胨,酵母提取物,英国 Oxoid 公司;琼脂粉,北京索莱宝科技有限公司;氯化钠,分析纯,天津市致远化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

1.2.1 射频加热杀菌装置 本试验所使用的食品射频加工设备由合肥哈工金浪装备科技有限公司研发(图1)。该设备由振荡发生器,传送带、射频处理腔,排风系统等部件组成,设备额定功率 6 kW,频率 27.12 MHz。射频处理腔由射频上极板、射频下极板和传送带构成,射频处理场面积为 600 mm×450 mm,通过传送带可以连续、大批量地对物料进行射频加热处理。极板间距在 50~210 mm 范围内线性可调,结合调整阳极输出电压等参数,可以改变射频与物料之间的射频能量耦合效率,从而改变物料在射频腔内的升温速率。射频腔内样品的实时温度可通过荧光光纤测温探头进行测量,可连接软件在电脑上对样品温度进行实时监测,并通过历史温度数据形成升温曲线,监测温度范围在-20~150 ℃,采集数据频率最低为 1 s/次。

有限公司医疗设备厂;HQ-FTS-I6F08 荧光光纤测温仪,西安和其光电科技有限公司;LC-08 拍打式无菌均质器,拓赫机电科技(上海)有限公司;DZD-500/2S 真空包装机,江苏腾通包装机械有限公司;加长食物槽高速切片器,广州刚古金属制品

有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 LB培养基配制 称取胰蛋白胨 10 g, 酵母提取物 5 g, 氯化钠 10 g, 溶于 1 000 mL 蒸馏水中, 121 °C 高压灭菌 15 min。LB 固体培养基在以上成分基础上添加 12 g 琼脂粉。

1.3.2 菌液制备 将菌株冻存管从 -80 °C 冰箱中取出, 在超净台上解冻 5 min 后, 挑取一环菌悬液, Z 字涂布于 LB 固体培养基中, 37 °C 下培养 24 h。挑取单菌落接种于 30 mL LB 液体培养基中, 置于 37 °C, 170 r/min 培养 24 h。

1.3.3 菌液计数 将培养好的菌液在 0.85% 生理盐水中进行梯度稀释, 选取 2~3 个适宜浓度菌液, 吸取 0.1 mL 于 LB 固体培养基中涂开, 37 °C 培养 24 h 后计数, 菌液浓度约为 10^{10} CFU/mL。

1.3.4 酸木瓜切片制备及接种 酸木瓜洗净后去皮去籽, 制成直径为 50 mm, 厚度为 5 mm 的切片。将切片置于超净台中, 每片接种 10 μ L 菌液, 分散于表面的 10 个点上。接种完毕后, 在超净台中风干 15 min 确保菌液固定于切片上, 每 5 片装入无

菌高温蒸煮袋中, 封口后备用。

1.3.5 射频-热水浴加热过程中冷点测定 为了确定射频-热水浴加热下样品的冷点, 将光纤测温探头插入分布在样品中的 3 个点(图 2)。在极板间距为 100 mm, 热水浴温度为 90 °C 的加热条件下, 测定 3 个点从 20 °C 到 80 °C 的升温时间(图 3)。

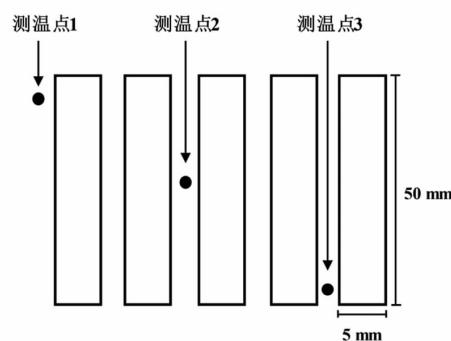


图 2 酸木瓜切片不同测温点示意图

Fig.2 Diagram of different temperature measurement points of *Chaenomeles sinensis* slices

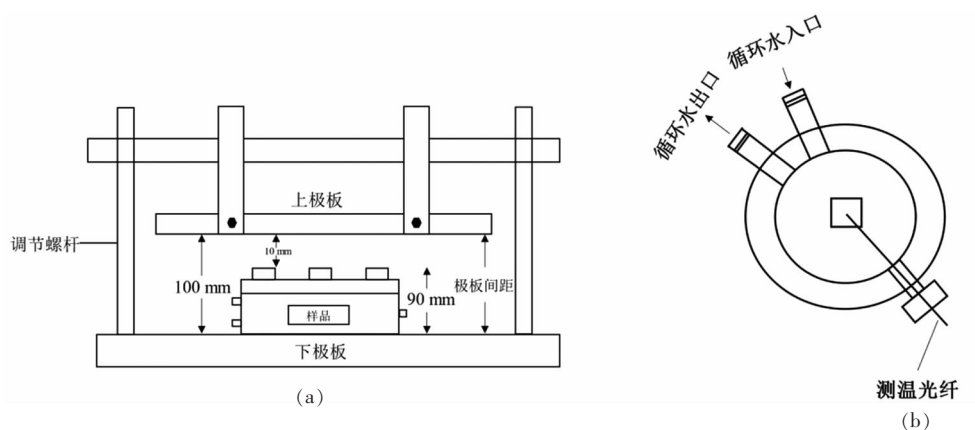


图 3 射频腔及杀菌釜俯视图

Fig.3 Schematic diagram of RF cavity (a) and top view of the pasteurization kettle (b)

1.3.6 不同极板间距对射频-热水浴加热过程的影响 100, 120, 140 mm 的极板间距被选择用于测定不同极板间距对射频-热水浴加热过程的影响, 将光纤测温探头插入冷点, 记录在不同极板间距下样品从 20 °C 加热至 85 °C 时的升温曲线及计算加热速率, 以单独热水浴加热作为对照。

1.3.7 不同极板间距对射频-热水浴杀菌时间的影响 将接种后的样品置于杀菌釜内, 并通入 90

°C 恒温循环热水, 固定射频极板间距为 100, 120, 140 mm, 杀菌后置于冰浴中冷却以停止加热效应, 测定未杀菌及杀菌后样品中的大肠杆菌总数, 以关闭射频加热系统仅通入恒温循环热水浴加热作为对照。

1.3.8 菌落计数 在超净台中将样品无菌移至无菌均质袋中, 加入 225 mL 0.85% 无菌生理盐水, 使用无菌均质器 12 次/s 拍打 2 min 至样品破碎

均匀,制成原液。将原液进行梯度稀释后,选取2~3个适宜稀释度,吸取0.1 mL于LB固体培养基中涂开,37℃培养24 h后对残存活菌进行计数。杀菌效果用加热前后样品中大肠杆菌总数的对数差表示,见公式(1)。

$$\lg S = \lg\left(\frac{N}{N_0}\right) \quad (1)$$

式中: N_0 为加热前样品中大肠杆菌总数,CFU/g; N 为加热后样品中大肠杆菌总数,CFU/g; $\lg S$ 为加热后样品中大肠杆菌减少的对数值。

1.4 杀菌动力学模型

本试验采用研究中常见的3种微生物失活模型(Linear模型、Weibull模型、Log-logistic模型)拟合射频-热水浴加热对酸木瓜果片中大肠杆菌的杀菌效果。

1.4.1 Linear模型 该模型认为大肠杆菌减少的对数值随射频-热水浴加热时间的变化呈线性变化,如式(2)所示。

$$\lg\left(\frac{N}{N_0}\right) = \frac{-t}{D} \quad (2)$$

式中: t 为加热时间,s; D 为减少90%大肠杆菌所需要的时间,s。

1.4.2 Weibull模型 该模型认为大肠杆菌种群中对于射频-热水浴加热的抗逆性存在差异,如式(3)所示。

$$\lg\left(\frac{N}{N_0}\right) = -bt^n \quad (3)$$

式中: b 为大肠杆菌生存率的对数^[20]; n 为形状参数,其决定菌落生存曲线的形状,当 $n < 1$ 时生存曲线呈凹状, $n > 1$ 时曲线呈凸状, $n = 1$ 时为线性模型; t 为加热时间,s。

1.4.3 Log-logistic模型 如式(4)所示:

$$\lg\left(\frac{N}{N_0}\right) = \delta + \frac{\omega - \delta}{1 + \exp\left(\frac{4\sigma(\tau - \lg t)}{\omega - \delta}\right)} \quad (4)$$

式中: δ 为上渐近线; ω 为下渐近线; σ 为大肠杆菌的最大失活率; τ 为达到最大失活率时所对应的对数时间。

1.4.4 模型评价 不同极板间距下射频-热水浴杀菌曲线进行模型拟合,得到大肠杆菌降低的对数值随加热时间变化的拟合方程,并使用 R^2 ,RMSE,Af和Bf等参数评价模型拟合程度。其中

R^2 和RMSE用于评价模型的拟合优度,当 R^2 越接近于1, RMSE的值越小,表明模型的拟合优度高;Af用于检验模型的偏离程度,Af值越小表明模型越准确,模型的预测精度越高;Bf用于检验模型预测值与实测值的偏差情况,Bf越接近于1,表明模型的预测情况越准确,其计算公式如式(5)~式(7)所示:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(\text{实测值} - \text{预测值})^2}{n-1}} \quad (5)$$

$$Af = 10^{(\sum|\lg(\frac{\text{预测值}}{\text{实测值}})|)/n} \quad (6)$$

$$Bf = 10^{(\sum\lg(\frac{\text{预测值}}{\text{实测值}}))/n} \quad (7)$$

式中: n 为试验值的个数。

1.5 数据统计与分析

每组试验进行3次测定,所有试验结果表示为平均值±标准差。使用Excel和SPSS 26.0软件进行数据处理与方差分析,并使用Origin2021对实验数据进行拟合并绘图。

2 结果与分析

2.1 样品冷点的测定

射频-热水浴加热过程中,由于电场分布不均匀,将会导致被加热样品中出现冷点和热点,在冷点处的加热不足可能会导致细菌的存活而引发食品安全风险^[21]。因此,首先确定样品在射频-热水浴加热下的冷点位置对于验证其杀菌效力具有重要意义。如图4所示,位于酸木瓜果片外层靠近上

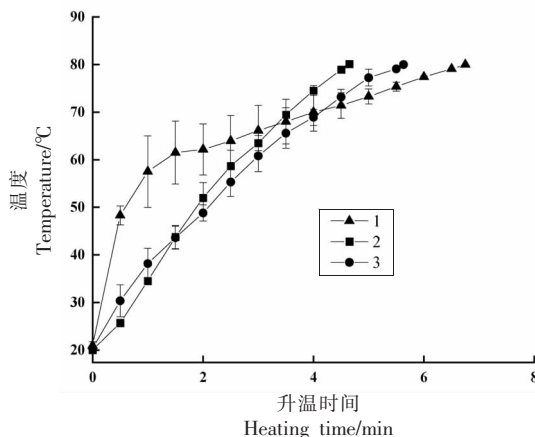


图4 不同测温点20~80℃升温曲线

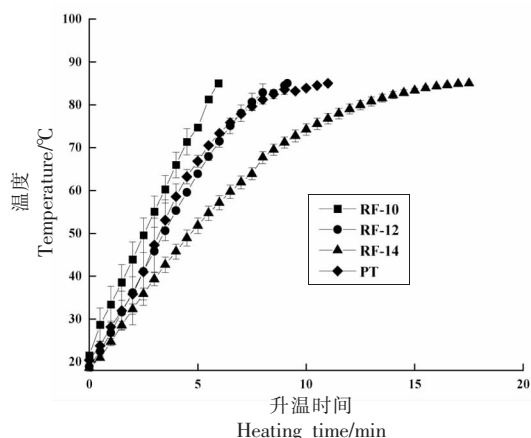
Fig.4 Heating curves from 20°C to 80°C at the different temperature measuring points

部分的测温点 1 为冷点, 其升温时间高于其它两点, 在 6.75 min 达到 80 °C。位于样品核心的测温点 2 升温时间最短, 在 4.65 min 达到 80 °C, 表明酸木瓜果片在射频-热水浴加热下表现出核心加热模式, 与 Jiang 等^[22]的研究结论一致, 这可能是因为电场在样品边缘发生偏转而集中在样品的中心部分, 导致样品核心与电场耦合较好, 实现了更高的加热效率。位于样品下部边缘处的测温点 3 表现出了与核心处相似的升温时间, 在 5.63 min 达到 80 °C, 可能是因为随着加热时间的增加, 果肉细胞破碎, 导致水分流出并聚集在样品底部, 致使底部样品的相对介电常数 ϵ' 增加, 耦合了更多的电场, 使得升温时间降低^[23-24]。因此, 测温点 1 被选择作为后续试验的冷点。

2.2 不同极板间距对射频-热水浴加热过程的影响

如图 5 所示, 随着极板间距从 100 mm 增加至 140 mm, 冷点升温至 85 °C 的时间分别为 5.95, 9.13 min 和 17.5 min, 其平均升温速率分别为 11.77 °C/min, 7.74 °C/min 和 3.81 °C/min。这可能是因为对于平行板式射频加热系统, 在射频加热过程中, 样品作为负载与极板形成工作电路, 通过调节极板间距改变该工作电路的发出频率, 实现与射频固有频率进行匹配, 完成从射频发生器向样品的能量传递, 从而达到加热样品的目的。而在一定极板间距范围内, 较窄的极板间距能减少空气分压, 增强电场, 从而实现较好地频率耦合, 实现较高的加热效率^[25]。

对于 PT 组, 其冷点升温至 85 °C 的时间为 11 min, 平均升温速率为 6.44 °C/min, 与之相比, RF-10 组减少了约一半的升温时间, 且 RF-10 组在加热后段的斜率大于 PT, 说明在加热前期, 由热水浴提供的热传导加热模式作为传热主体提供了较快的升温速率, 随着样品与热水浴温差的减小, 热水浴传热效率降低, RF-10 组的传热主体转为射频能量加热, 提供了比热水浴更快的加热速率, 从而降低了加热时间^[26]。由于 100, 120, 140 mm 极板间距下冷点的升温速率具有显著性差异, 分别代表最快、适中和最慢的加热速率, 因此被选择用于比较对大肠杆菌杀菌效果的影响。



注: RF-10, 100 mm 极板间距下射频-热水浴加热; RF-12, 120 mm 极板间距下射频-热水浴加热; RF-14, 140 mm 极板间距下射频-热水浴加热; PT, 仅热水浴加热(下同)。

图 5 不同极板间距下射频-热水浴加热及单独热水浴加热升温曲线

Fig.5 Heating curves of RF combined hot water bath heating under different electrode gaps and hot water bath heating

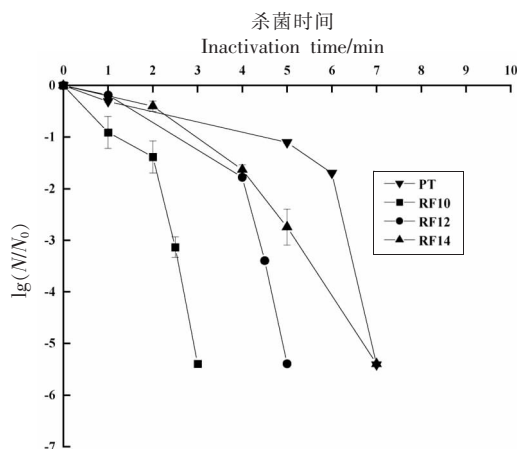


图 6 不同极板间距下射频-热水浴加热及单独热水浴加热杀菌曲线

Fig.6 Inactivation curves of RF combined hot water bath heating under different electrode gaps and hot water bath heating

2.3 不同极板间距对射频-热水浴杀菌效果的影响

图 6 显示了不同极板间距下射频-热水浴加热对大肠杆菌的灭活曲线, 表明极板间距能显著影响大肠杆菌的灭活。在 100 mm 极板间距下观察到使大肠杆菌减少 5 个对数的最短时间, 为 3

min, 120 mm 极板间距下使大肠杆菌减少 5 个对数的时间为 5 min, 在 140 mm 极板间距下观察到最长的灭菌时间, 为 7 min, 与单独热水浴加热的灭菌时间相同。

将升温曲线与大肠杆菌灭活曲线进行比较分析, 可知随着加热时间的延长, 大肠杆菌的致死率明显增加, 加热时间为 60 s 时, 不同极板间距下样品温度均在 40 °C 以下, 未达到大肠杆菌的热致死温度, 菌落数没有明显变化, 随着加热时间的延长, 菌落数开始明显下降, 当样品温度达到 80 °C 后, 所有处理组中大肠杆菌都被灭活, 使菌落总数减少了 5 个对数, 达到了巴氏杀菌的目标效力^[27]。与上节所得出的结论相同, 较窄的极板间距提高了对样品的加热速率, 从而减少了加热时间和灭菌时间, 表明加热温度是影响射频-热水浴杀菌效果的重要因素^[28]。

2.4 动力学模型拟合分析

采用 3 种常见的微生物失活动力学模型, 即 Linear 模型、Weibull 模型、Log-logistic 模型对不同极板间距下射频-热水浴对大肠杆菌的失活曲线进行拟合, 拟合模型参数如表 1 所示。

Linear 模型用于描述加热时间与加热处理后样品中菌落总数减少的对数值的关系, 其假定大肠杆菌群体具有相同的热抵抗力, 因此菌落总数减少的对数值与加热时间呈线性关系^[29-30]。使用 Linear 模型拟合射频-热水浴加热下大肠杆菌杀

菌曲线的参数显示, 拟合方程的决定系数 R^2 分别为 0.8172, 0.8067 和 0.8989, 而单独热水浴杀菌拟合方程的决定系数 R^2 为 0.6294, 表明拟合精度较差, Linear 模型并不能有效地拟合射频-热水浴加热和单独热水浴加热对酸木瓜中大肠杆菌的失活规律。因此使用 Weibull 和 Log-logistic 等两种非线性模型进行拟合, Weibull 模型假定大肠杆菌群体内的热抵抗力具有异质性, 并将大肠杆菌受热致死视为概率事件, 杀菌曲线则视为受热致死事件的累积形式^[31-32], 使用 Weibull 模型拟合不同加热条件下大肠杆菌杀菌曲线的参数显示, 拟合方程的决定系数 R^2 分别为 0.9779, 0.9700, 0.9973 和 0.9996, 具有较高的拟合精度, 能够较好地拟合不同加热条件下大肠杆菌的杀菌曲线。Log-logistic 模型假定大肠杆菌种群内存在不同的热抵抗力, 并且这种差异是永久性的^[33]。使用 Log-logistic 模型拟合不同加热条件下大肠杆菌杀菌曲线的参数显示, 拟合方程的决定系数 R^2 分别为 0.9847, 0.9793, 0.9992 和 0.9997, 均高于 Linear 和 Weibull 模型拟合方程的决定系数, 具有较高的拟合精度, 能够较好地拟合不同加热条件下大肠杆菌的杀菌曲线。

为了评价模型的拟合效果, 将同一模型不同加热条件下的所有实测值作为横坐标, 失活动力学模型相应的预测值作为纵坐标, 进行线性回归分析, 实测值与预测值越接近, 表明其线性程度越

表 1 大肠杆菌射频-热水浴失活动力学 3 种模型的拟合参数

Table 1 Kinetics parameters of three inactivation kinetics models for the *E. coli* treated by radio frequency combined hot water bath

因素	Linear 模型		Weibull 模型			Log-logistic 模型					
	D	R^2	b	n	R^2	ω	ϑ	τ	σ	R^2	
水浴杀菌		1.80	0.6294	0.00002	6.32	0.9779	-176.99	-0.26	1.04	-751.47	0.9847
	100	0.62	0.8172	0.21427	2.93	0.9700	-65.16	-0.35	0.73	-137.15	0.9793
极板间距/mm	120	1.10	0.8067	0.00251	4.77	0.9973	-11.21	-0.09	0.70	-47.12	0.9992
	140	1.32	0.8989	0.09431	2.08	0.9996	-33.80	-0.02	1.15	-45.18	0.9997

表 2 失活动力学模型评价参数

Table 2 Evaluation parameters of inactivation kinetics models

模型	拟合方程	Af	Bf	RMSE	R^2
Linear	$y=0.8389x-0.9239$	1.3996	1.3582	0.8721	0.8381
Weibull	$y=1.0133x+0.0719$	1.3551	0.7572	0.1792	0.9901
Log-logistic	$y=0.9930x-0.0147$	1.0884	0.9334	0.1189	0.9931

高,模型的拟合精度也就越高。如图 7 所示,相较于 Linear 模型,Weibull 和 Log-logistic 两种非线性模型回归方程的 R^2 和斜率更接近于 1,且截距均趋近于 0,因此通过 Af、Bf、RMSE、 R^2 这 4 个评价参数进一步比较模型的拟合精度。如表 2 所示,在 3 个拟合模型中,Log-logistic 模型的 Af 值最低且 Bf 值最接近于 1, R^2 最高且 RMSE 最小,表明 Log-logistic 模型具有较高的拟合精度,能较为准确地体现大肠杆菌在射频-热水浴加热下的失活规律。

Log-logistic 模型中的 σ 表示大肠杆菌的最大失活率, τ 表示达到最大失活率的时间^[34]。在达到同等杀菌效力的条件下(致死对数 $>5 \lg$),单独热水浴杀菌虽然对大肠杆菌具有最大的失活率,但同时也延长了杀菌时间,考虑到需要最大化减少杀菌时间以减少热处理对酸木瓜风味品质的影响,射频-热水浴杀菌能够在较短的杀菌时间内达到较高的大肠杆菌失活率而可作为热水浴杀菌的潜在替代方案。Linear 模型拟合结果也表明相较单独热水浴杀菌,射频-热水浴杀菌降低了大肠杆菌的 D 值,表明大肠杆菌的耐热性降低,并且随着极板间距的升高,加热速率降低, D 值逐渐升高。Weibull 模型也表明射频-热水浴杀菌提高了 b 值,表明大肠杆菌的耐热性相较单独热水浴杀菌有所降低。Zhang 等^[35]也报道了相似的研究结论,通过将红辣椒粉加热至 62, 65, 68, 71 $^{\circ}\text{C}$, 其中的大肠杆菌 ATCC 25922 的 D 值分别为 18.28, 10.10, 5.37 和 3.95, 表明高温是热杀菌过程中影响大肠杆菌耐热性的主要因素。射频-热水浴杀菌通过射频进行快速加热,并结合热水浴的热传导进一步提高了加热均匀性与保温效果^[36],从而实现了酸木瓜快速升温达到高温环境,降低了大肠杆菌的耐热性从而提高了杀菌效率。

3 结论与讨论

本试验中,通过改变射频极板间距,研究不同极板间距条件下射频-热水浴加热对酸木瓜果片中大肠杆菌的灭活作用。在射频-热水浴加热过程中,样品表现出核心加热模式,且冷点位于样品外层靠近上部分的测温点 1, 这可能是因为电场在样品边缘发生偏转而集中在样品的中心部分导致

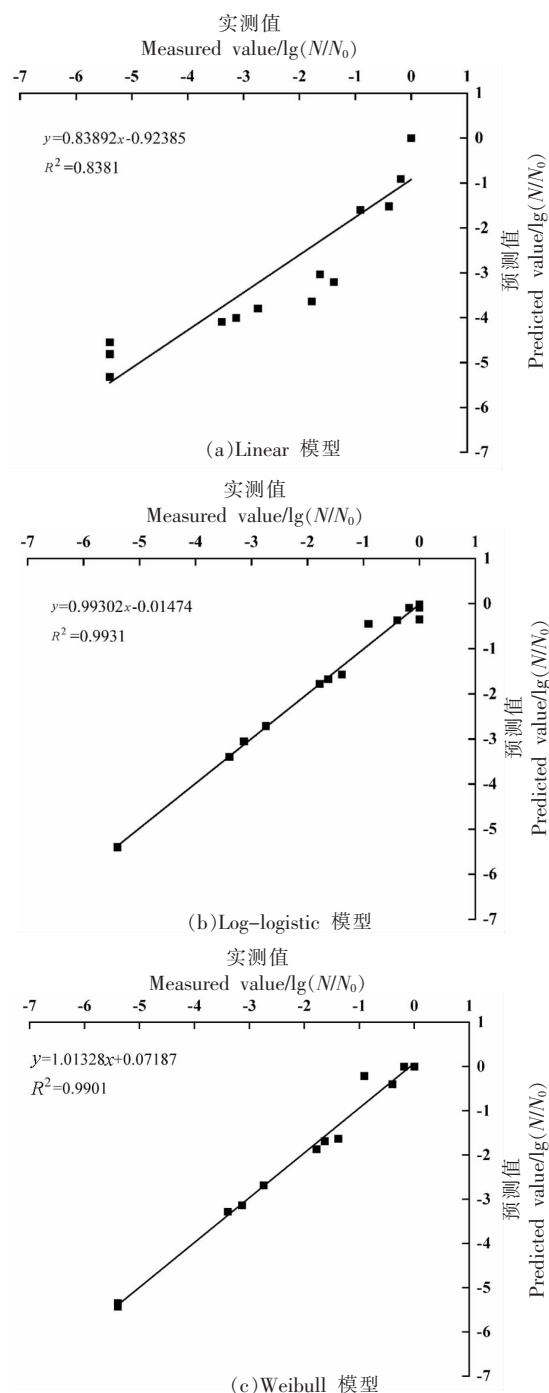


图 7 不同失活动力学模型实测值与预测值回归分析
Fig.7 Regression analysis between the measured value and the predicted value of different inactivation kinetics models

的。随着极板间距的增大,空气分压增大,样品与电场的耦合效率降低,样品的升温速率降低,升温时间变长,杀菌时间也同时增加,100 mm 的射频

极板间距为最佳加热条件,在此极板间距下,射频-热水浴加热使大肠杆菌减少5个对数仅需3 min,相较单独热水浴杀菌减少了一半的时间,减少了酸木瓜果片在传统热水浴巴氏杀菌下经受的过量热处理。

射频-热水浴加热下大肠杆菌的对数减少量与处理时间呈非线性关系,因此不符合Linear模型。Weibull和Log-logistic模型均能够较好地拟合射频-热水浴加热下大肠杆菌的失活曲线,通过比较拟合模型评价参数,其中Log-logistic模型具有最高的拟合精度,能够较好地拟合大肠杆菌在射频-热水浴加热下的失活规律,与雷玉洁等^[28]的研究结果一致。相较单独热水浴杀菌,射频-热水浴杀菌通过介电加热提高了酸木瓜果片的升温速率,并结合热水浴的热传导进一步提高了加热均匀性与保温效果,从而实现了对酸木瓜的快速升温使之达到高温环境,从而降低大肠杆菌的耐热性提高了杀菌效率,减少了酸木瓜果片在杀菌过程中受到的过量热处理。试验结果表明,射频结合热水浴杀菌是一种能有效灭活鲜切酸木瓜果片中大肠杆菌的杀菌方法。

参 考 文 献

- [1] 杨旭. 浑浊型光皮木瓜果汁的配方优化[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(10): 123-128.
YANG X. Optimizing the formulation of *Chaenomeles sinensis* (Thouin) Koehne cloudy juice[J]. Food Research and Development, 2021, 42(10): 123-128.
- [2] 向进乐, 罗磊, 马丽苹, 等. 木瓜酒和木瓜醋发酵工艺及其有机酸组成分析[J]. 食品科学, 2016, 37(23): 191-195.
XIANG J L, LUO L, MA L P, et al. Fermentation and organic acid composition of wine and vinegar from *Chaenomeles sinensis* Fruits[J]. Food Science, 2016, 37(23): 191-195.
- [3] 纪楨, 第五曷曷, 俎花花, 等. 响应面法优化光皮木瓜粉制备工艺[J]. 食品工业, 2021, 42(5): 106-110.
JI Z, DIWU B B, ZU H H, et al. Optimization of the ball-milling technology for preparation of *Chaenomeles sinensis* powder by response surface methodology[J]. The Food Industry, 2021, 42(5): 106-110.
- [4] SALLEH-MACK S Z, ROBERTS J S. Ultrasound pasteurization: The effects of temperature, soluble solids, organic acids and pH on the inactivation of *Escherichia coli* ATCC 25922[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2007, 14(3): 323-329.
- [5] YI J J, KEBEDE B T, GRAUWET T, et al. Comparing the impact of high-pressure processing and thermal processing on quality of 'Hayward' and 'Jintao' kiwifruit purée: Untargeted headspace fingerprinting and targeted approaches [J]. Food and Bioprocess Technology, 2016, 9(12): 2059-2069.
- [6] LARA G, TAKAHASHI C, NAGAYA M, et al. Improving the shelf life stability of vacuum-packed fresh-cut peaches (*Prunus persica* L.) by radio frequency heating in water[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(6): 3251-3262.
- [7] ORSAT V, GARIÉPY Y, RAGHAVAN G S V, et al. Radio-frequency treatment for ready-to-eat fresh carrots[J]. Food Research International, 2001, 34(6): 527-536.
- [8] JIAO Y, TANG J M, WANG Y F, et al. Radio-frequency applications for food processing and safety [J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2018, 9(1): 105-127.
- [9] KOU X X, LI R, HOU L X, et al. Identifying possible non-thermal effects of radio frequency energy on inactivating food microorganisms [J]. International Journal of Food Microbiology, 2018, 269: 89-97.
- [10] ZHANG L H, LAN R G, ZHANG B H, et al. A comprehensive review on recent developments of radio frequency treatment for pasteurizing agricultural products[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021, 61(3): 380-394.
- [11] HOU L X, JOHNSON J A, WANG S J. Radio frequency heating for postharvest control of pests in agricultural products: A review[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 113: 106-118.
- [12] YAO Y S, ZHANG B, ZHOU L F, et al. Steam-assisted radio frequency blanching to improve heating uniformity and quality characteristics of stem lettuce cuboids[J]. Food and Bioprocess Technology, 2022, 15(8): 1907-1917.
- [13] OZTURK S, KONG F, SINGH R K, et al. Dielec-

- tric properties, heating rate, and heating uniformity of various seasoning spices and their mixtures with radio frequency heating[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 228: 128–141.
- [14] WANG Y Q, HOU Q, ZHANG E P, et al. Radio frequency pasteurization and heating uniformity of canned pineapple[J]. *Journal of Food Science*, 2022, 87(6): 2640–2650.
- [15] YANG Y S, GEVEKE D J. Shell egg pasteurization using radio frequency in combination with hot air or hot water[J]. *Food Microbiology*, 2020, 85: 103281.
- [16] HU S Z, ZHAO Y Y, HAYOUKA Z, et al. Inactivation kinetics for *Salmonella typhimurium* in red pepper powders treated by radio frequency heating[J]. *Food Control*, 2018, 85: 437–442.
- [17] JIAO S H, ZHANG H J, HU S Z, et al. Radio frequency inactivation kinetics of *Bacillus cereus* spores in red pepper powder with different initial water activity[J]. *Food Control*, 2019, 105: 174–179.
- [18] GAO Y, GUAN X Y, WAN A L, et al. Thermal Inactivation kinetics and radio frequency control of *Aspergillus* in almond kernels[J]. *Foods*, 2022, 11(11): 1603.
- [19] DINÇER C, TOPUZ A. Inactivation of *Escherichia coli* and quality changes in black mulberry juice under pulsed sonication and continuous thermosonication treatments[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2015, 39(6): 1744–1753.
- [20] BUZRUL S. The weibull model for microbial inactivation[J]. *Food Engineering Reviews*, 2022, 14(1): 45–61.
- [21] HUANG Z, MARRA F, SUBBIAH J, et al. Computer simulation for improving radio frequency (RF) heating uniformity of food products: A review [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2018, 58(6): 1033–1057.
- [22] JIANG H Y, LING B, ZHOU X, et al. Effects of combined radio frequency with hot water blanching on enzyme inactivation, color and texture of sweet potato[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 66: 102513.
- [23] PIYASENA P, DUSSAULT C, KOUTCHMA T, et al. Radio frequency heating of foods: Principles, applications and related properties—A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2003, 43(6): 587–606.
- [24] 周敏姑, 欧业宝, 张丽, 等. 苹果介电特性对其射频加热均匀性的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(20): 273–279.
- ZHOU M G, OU Y B, ZHANG L, et al. Effect of dielectric properties on radio frequency heating uniformity of apple[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(20): 273–279.
- [25] YAO Y S, SUN Y N, CUI B Z, et al. Radio frequency energy inactivates peroxidase in stem lettuce at different heating rates and associate changes in physiochemical properties and cell morphology [J]. *Food Chemistry*, 2021, 342: 128360.
- [26] WANG K, RAN C Y, CUI B Z, et al. Sterilizing ready-to-eat poached spicy pork slices using a new device: Combined radio frequency energy and superheated water[J]. *Foods*, 2022, 11(18): 2841.
- [27] MAHNOT N K, MAHANTA C L, KEENER K M, et al. Strategy to achieve a 5-log *Salmonella* inactivation in tender coconut water using high voltage atmospheric cold plasma (HVACP)[J]. *Food Chemistry*, 2019, 284: 303–311.
- [28] 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 Y J, ZHOU L F, LI Y K, 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.
- [29] PELEG M, COLE M B. Reinterpretation of microbial survival curves[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1998, 38(5): 353–380.
- [30] SCHAFFNER D W, LABUZA T P. Predictive microbiology: Where are we, and where are we going? [J]. *Food Technology (Chicago)*, 1997, 51(4): 95–99.
- [31] PIN C, BARANYI J. Kinetics of single cells: Observation and modeling of a stochastic process [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2006, 72(3): 2163–2169.
- [32] VAN BOEKEL M A J S. On the use of the Weibull model to describe thermal inactivation of microbial vegetative cells[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2002, 74(1): 139–159.

- [33] COLE M B, DAVIES K W, MUNRO G, et al. A vitalistic model to describe the thermal inactivation of *Listeria monocytogenes* [J]. *Journal of Industrial Microbiology*, 1993, 12(3/4/5): 232–239.
- [34] DU Y H, MI S N, WANG H H, et al. Inactivation mechanism of *Alternaria alternata* by dielectric barrier discharge plasma and its quality control on fresh wolfberries[J]. *Food Control*, 2023, 148: 109620.
- [35] ZHANG B H, ZHANG L H, CHENG T, et al. Effects of water activity, temperature and particle size on thermal inactivation of *Escherichia coli* ATCC 25922 in red pepper powder [J]. *Food Control*, 2020, 107: 106817.
- [36] XU J C, ZHU S N, ZHANG M, et al. Combined radio frequency and hot water pasteurization of *Nostoc sphaeroides*: Effect on temperature uniformity, nutrients content, and phycocyanin stability[J]. *LWT*, 2021, 141: 110880.

Study of Inactivation Kinetics of Radio Frequency Combined Hot Water Bath on *Chaenomeles sinensis* Inoculated with *Escherichia coli*

Yin Yihao^{1,2,3}, Sun Shouqingyun^{1,2,3}, Guo Chaofan^{1,2,3*}, Song Zibo^{5,6}, Hu Xiaosong^{1,4}, Yi Junjie^{1,2,3,6}

(¹Faculty of Food Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500)

²Yunnan Engineering Research Center for Fruit & Vegetable Products, Kunming 650500)

³International Green Food Processing Research and Development Center of Kunming City, Kunming 650500)

⁴College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083)

⁵Yunnan Provincial Key Laboratory of Applied Technology for Special Forest Fruits, Yuxi 653100, Yunnan)

⁶Yunnan Maoduoli Group Food Co., Ltd., Yuxi 653100, Yunnan)

Abstract Due to the inherent disadvantage of heat transfer, the traditional water bath pasteurization technology may lead to excessive heating of fresh-cut *Chaenomeles sinensis* slices, resulting in serious deterioration of flavor quality. Radio frequency (RF) combined hot water bath pasteurization, which can improve the heating efficiency and uniformity through volumetric heating for the food, thus reducing the heat resistance of microorganisms and inactivation time and can effectively minimize the adverse effects of heat transfer on heat-sensitive components such as flavor, nutrition, and colors of the fruit slices. In this study, *E. coli* was selected as the target microorganism to assess the impact of different RF electrode gaps on the heating characteristics and pasteurization efficiency of inoculated *E. coli* fruit slices. The inactivation kinetics of RF combined hot water bath pasteurization were fitted using Linear, Weibull, and Log-logistic models. The results revealed that RF combined hot water bath heating significantly increased the heating rate of *Chaenomeles sinensis* slices and reduced the heat resistance of *E. coli* and inactivation time compared with water bath pasteurization, when employing 100 mm electrode gaps, RF combined hot water bath pasteurization reduced the inactivation time by approximately 57% (lethality>5 lg). Compared the fit evaluation parameters Af, Bf, RMSE, and R^2 of the inactivation kinetic model, the Log-logistic model exhibited the highest fitting accuracy (Af: 1.0884, Bf: 0.9334, RMSE: 0.1189, R^2 : 0.9931). Furthermore, the predicted values of the Log-logistic model closely aligned with the measured values, confirming that the Log-logistic model provided a more accurate representation of the inactivation pattern of *E. coli* inoculated in fresh-cut *Chaenomeles sinensis* slices during RF combined hot water bath pasteurization. Results suggested that RF combined hot water bath pasteurization can be considered as an effective pasteurization method for fresh-cut *Chaenomeles sinensis* slices.

Keywords fresh-cut fruit slices; radio frequency pasteurization; *Escherichia coli*; inactivation kinetics; model fitting