

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250227007

引用格式: 李思瑜, 和劲松, 叶树芯, 等. 不同并联技术对三七鲜切片表面大肠杆菌的杀菌效果比较[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(10): 206–216.

LI SY, HE JS, YE SX, *et al.* Comparison of the bactericidal effects of different parallel techniques on *Escherichia coli* on the surface of *Panax notoginseng* fresh slices [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(10): 206–216. (in Chinese with English abstract).

不同并联技术对三七鲜切片表面大肠杆菌的 杀菌效果比较

李思瑜, 和劲松, 叶树芯, 董文明*, 高 晴*

(云南农业大学食品科学技术学院, 昆明 650201)

摘要: **目的** 比较超高压(high pressure, HP)、微酸性电解水(slightly acidic electrolyzed water, SAEW)并行联合处理(HP-SAEW)和热处理(thermd treatment, T)、SAEW 并行处理(T-SAEW)对三七鲜切片表面大肠杆菌(*Escherichia coli*, *E. coli*)的杀菌效应。**方法** 以三七鲜切片为研究对象, 大肠杆菌为模型菌, 用平板计数法测定表面 *E. coli* 菌落数, 探究两种不同并行联合处理方式中不同料液比、时间、有效氯浓度(available chlorine concentration, ACC)、压强、温度对三七鲜切片的杀菌效果, 并分析菌落数变化的协同效应。**结果** HP-SAEW 并行联合处理对三七鲜切片在 ACC (27.6~52.2 mg/L)、压强(98.5~297.5 MPa)、料液比(1.76~5.88 g/mL)、处理时间(5.56~9.48 min)的区间内具有协同效应, 杀菌效果优于其单独处理时杀菌效果之和; T-SAEW 并行联合处理对三七鲜切片在 ACC (25.44~46.88 mg/L)、温度(39.78~53.85 °C)、料液比(2.27~4.42 g/mL)、处理时间(5.02~9.84 min)的区间内具有协同效应, 杀菌效果优于其单独处理时杀菌效果之和。**结论** 并行联合作用在特定参数区间内存在着协同增强效应, T-SAEW 并联技术能更有效抑制三七鲜切片表面微生物的生长, 后续可基于此研究鲜三七保鲜贮藏品质变化, 并应用于生产。

关键词: 三七鲜切片; 超高压; 微酸性电解水; 热处理; 并联处理; 协同效应

Comparison of the bactericidal effects of different parallel techniques on *Escherichia coli* on the surface of *Panax notoginseng* fresh slices

LI Si-Yu, HE Jin-Song, YE Shu-Xin, DONG Wen-Ming*, GAO Qing*

(College of Food Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

ABSTRACT: Objective To compare the bactericidal effects of high pressure (HP), slightly acidic electrolyzed

收稿日期: 2025-02-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(32060573); 云南省农业联合专项(202301BD070001-106); 云南省重大科技专项计划项目(202202AE090019, 202302AE090022, 202402AE090011)

第一作者: 李思瑜(2000—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为农产品加工及贮藏工程。E-mail: 1369909524@qq.com

*通信作者: 董文明(1973—), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向为食品科学。E-mail: 969438516@qq.com

高晴(1989—), 女, 硕士, 高级实验师, 主要研究方向为食品营养与质量安全控制。E-mail: 2763911754@qq.com

water (SAEW) their combination (HP-SAEW) and thermal treatment (T), slightly acidic electrolyzed water combination treatment (T-SAEW) on *Escherichia coli* at the surface of *Panax notoginseng* fresh slices. **Methods** The *E. coli* was being used as the model bacteria and the standard plate counting method was adopted to determine the colony count of *E. coli*. The bactericidal effects of the two parallel treatment methods (HP-SAEW and T-SAEW) on *Panax notoginseng* fresh slices under different factors (solid-liquid ratio, processing times, available chlorine concentration (ACC), pressure and temperature) were studied and the synergistic effect analysis were further measured. **Results** The HP-SAEW parallel processing exhibited synergistic effect on the *Panax notoginseng* fresh sliced within a certain range of ACC (27.6–52.2 mg/L), pressure (98.5–297.5 MPa), solid-liquid ratio (1.76–5.88 g/mL), and processing time (5.56–9.48 min). The bactericidal effect of the HP-SAEW parallel treatment was better than that treated alone (SAEW or HP). The T-SAEW parallel processing exhibited synergistic effect on the *Panax notoginseng* fresh sliced within a certain range of ACC (25.44–46.88 mg/L), temperature (39.78–53.85 °C), solid-liquid ratio (2.27–4.42 g/mL), and processing time (5.02–9.84 min). The bactericidal effect of the T-SAEW parallel treatment was better than that treated alone (SAEW or T). **Conclusion** The parallel combined effect has synergistic enhancement effect in the specific processing parameter range, T-SAEW parallel technology can more effectively inhibit the growth of surface microorganisms in fresh slices. On this basis, the quality change in the storage process of fresh *Panax notoginseng* can be carried out and applied in the actual production process in the future work.

KEY WORDS: *Panax notoginseng* fresh slices; high pressure; slightly acidic electrolyzed water; thermal treatment; parallel treatment; synergistic effect

0 引言

三七为五加科人参属植物三七 [*Panax notoginseng* (Burkill.) F. H. Chen ex C. H. Chow] 的块根^[1]。在云南、广西民间常把三七和其他食材搭配起来食用, 常见的菜肴有三七炖鸡、三七蒸血鸽、三七蒸鸡蛋等。市售的三七产品大多以干三七形式出现, 然而干制过程会造成三七营养价值的损失, 无法满足消费者的需求。新鲜三七制品不仅其活性成分流失较少, 更便于消费者加工食用。然而鲜三七中水分含量较高, 在贮藏运输过程中易受微生物污染使其腐烂^[2], 其中三七的主要污染菌有杆菌、毛霉属、根霉属以及酵母菌^[3]。为保证三七鲜切片的安全与卫生, 在其加工过程中需要进行杀菌处理。

食品工业加工过程中常采用的杀菌方法主要是热杀菌和非热杀菌。食品的热处理(thermal treatment, T)是一种传统杀菌方法, 主要有湿热杀菌、干热杀菌、微波杀菌、电热杀菌等, 然而温度较高时会破坏食品的维生素和蛋白质等营养成分, 降低食品的营养价值, 口感变差^[4]。而非热杀菌技术能不破坏营养成分和风味对食品进行无菌化处理, 被广泛应用于食品药品领域。非热杀菌技术主要有超高压(high pressure, HP)、紫外线、脉冲电场、微酸性电解水(slightly acidic electrolyzed water, SAEW)、超声波等。其中 HP 能在常温或低温下显著抑制食品中微生物

物生长^[5-6], 钝化食品中酶的活性, 改善食品功能特性, 有效保留食品原本的营养成分与风味。HP 技术在实际操作过程中, 过高的压力会导致能耗增加, 此外, 食品中压敏性成分会受到不同程度的破坏, 进而导致食品本身品质、外观、风味发生不良改变; SAEW 具有杀菌效果好、无色无臭、安全性高等特点, 可以满足食品药品在加工过程中的杀菌需求^[7-8], 但 SAEW 在处理过程中存在有效氯浓度(available chlorine concentration, ACC)易衰减的问题。

单一技术要达到理想的杀菌效果需要消耗较高的能量或使用剂量大, 食品品质容易受到影响。目前, 众多国内外学者致力于将多种杀菌技术相互结合, 应用于食品的杀菌保鲜领域。通过结合不同技术的优势, 能够在较低能耗、较低加工参数以及更低浓度的条件下, 实现理想的杀菌效果。研究发现并联技术在食品中能显著降低其表面的微生物菌落总数, 并且有良好的保鲜效果^[9-11]。大肠杆菌(*Escherichia coli*, *E. coli*)常被用作模型菌来评价单一技术与并联技术的杀菌效果及协同效应。例如, 在前人研究中, 已建立 SAEW-超声波并联处理鲜切生菜表面 *E. coli* 的杀菌效果^[12]及中温 SAEW 并联处理鲜切苹果、米线表面 *E. coli* 的杀菌协同模型^[13-14]。

综上, 本研究选用 *E. coli* 作为模型菌, 采用 HP-SAEW 及 T-SAEW 并联技术处理三七鲜切片, 比较不同并联技术对三七鲜切片表面 *E. coli* 的杀菌效果及协同效

应,为鲜切果蔬保鲜行业提供理论支持,降低行业成本。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

新鲜三七(云南省文山壮族苗族自治州丘北县);大肠杆菌[*E. coli* (CICC 10305)](中国工业微生物菌种保藏中心)。

磷酸盐缓冲液、碘化钾、可溶性淀粉、硫代硫酸钠、冰乙酸(分析纯,上海吉至生化科技有限公司);盐酸(分析纯,国药集团化学试剂有限公司);溶菌肉汤(Luria-Bertani, LB)培养基、结晶紫中性红胆盐琼脂(violet red bile agar, VRBA)培养基(青岛高科技工业园海博生物技术有限公司);实验所用的 SAEW 由本实验室自行制备。

1.2 主要仪器与设备

HPLL1-600/5 超高压设备(天津华泰森森生物工程技术有限公司);水神 HD-240L 型次氯酸水发生器(上海富强旺卫生用品有限公司);SW-CJ-1F 型超净工作台(苏州尚田洁净技术有限公司);YX280 手提式不锈钢压力蒸汽灭菌器(上海三审医疗器械有限公司);LRH-60A 新型恒温生化培养箱(北京泰宏君仪器有限公司);SM220.4 型电子天平(精度 0.1 mg,上海卓精电子科技有限公司);GL-1650 高速冷冻离心机(四川蜀科仪器有限公司);FS-300 封口机(南宁龙奥包装机械有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 SAEW 的制备及其浓度的测定

配制 1.69 mol/L 的稀盐酸,通过次氯酸水发生器制备得到 SAEW。经碘量法测定,不同电流分别对应着不同的 ACC 数值^[15]。绘制标准曲线时,以电流为横坐标(X),不同的 ACC 数值作为纵坐标(Y , mg/L),绘制标准曲线获得方程为 $Y=6.11X+23.996$ ($r^2=0.9938$)。

1.3.2 菌悬液的制备和样品接种

参考和劲松等^[16]的方法,对 *E. coli* (CICC 10305)冻干粉进行活化,最后确保菌液中活菌数量达 10^8 CFU/mL。

新鲜三七经自来水清洗干净后,用无菌刀将材料切成厚度为 2 mm 的薄片,最后将薄片置于超净工作台中,利用紫外灯照射 30 min。为除去残留在表面的微生物,染菌时,菌液与鲜切三七片以 2:1 g/mL 的料液比充分浸泡,染菌时间为 15 min。完成染菌后,将鲜切三七片置于超净台内平铺放置 30 min,以便沥干菌液。

1.3.3 HP 对三七鲜切片的杀菌处理

取接种好的三七鲜切片,以每份 5 g 置于含无菌水的包装袋,排出空气,通过手压式热封机封口,再实施 HP 处理。以不同压强(100、150、200、250 MPa),料液比[1:1、1:3、1:5、1:7, (g/mL)],处理时间(6、8、10、12 min)对三七鲜切片进行处理。保压结束后,将样品取出,以未处理

作为对照,样液梯度稀释,进行微生物检测。

通过单因素实验确定单一技术杀菌条件,根据 Box-Behnken 设计原理,选择各因素的最佳水平为 0 水平,以活菌数为响应值进行响应面优化实验,利用软件 Design-Expert 12 分析从而确定最佳杀菌条件。具体响应面实验因素及水平见表 1。

表 1 响应面实验因素及水平(一)
Table 1 Response surface test factors and levels (one)

因素	水平		
	-1	0	1
A 料液比(g/mL)	1	3	5
B 压强/MPa	100	150	200
C 处理时间/min	6	8	10

1.3.4 SAEW 对三七鲜切片的杀菌处理

在无菌条件下,将接种好的每份 5 g 三七鲜切片以不同料液比[1:1、1:3、1:5、1:7、1:9, (g/mL)],不同 ACC (30、35、40、50、60 mg/L),处理时间(6、8、10、12 min)进行杀菌处理,结束后加入 1 mL 质量分数 0.5%的硫代硫酸钠溶液终止反应,以未处理作为对照,进行微生物检测。

通过单因素实验确定单一技术杀菌条件,根据 Box-Behnken 设计原理,选择各因素的最佳水平为 0 水平,以活菌数为响应值进行响应面优化实验,利用软件 Design-Expert 12 分析从而确定最佳杀菌条件。具体响应面实验因素及水平见表 2。

表 2 响应面实验因素及水平(二)
Table 2 Response surface test factors and levels (two)

因素	水平		
	-1	0	1
A 料液比(g/mL)	1	3	5
C 处理时间/min	6	8	10
D ACC/(mg/L)	30	40	50

1.3.5 T 对三七鲜切片的处理

取接种好的三七鲜切片,以每份 5 g 置于含无菌水的包装袋,排出空气,通过手压式热封机封口,再实施 T。以不同温度(40、45、50、55、60 °C),料液比[1:1、1:3、1:5、1:7, (g/mL)],处理时间(2.5、5.0、7.5、10.0、12.5 min)对三七鲜切片进行处理。处理结束后,将样品取出,以未处理作为对照,样液梯度稀释,进行微生物检测。

通过单因素实验确定单一技术杀菌条件,根据 Box-Behnken 设计原理,选择各因素的最佳水平为 0 水平,以活菌数为响应值进行响应面优化实验,利用软件 Design-Expert 12 分析从而确定最佳杀菌条件。具体响应面实验因素及水平见表 3。

表 3 响应面实验因素及水平(三)
Table 3 Response surface test factors and levels (three)

因素	水平		
	-1	0	1
A 料液比(g/mL)	1	3	5
E 温度/°C	45	50	55
C 处理时间/min	5.0	7.5	10.0

1.3.6 HP 与 SAEW 并行结合杀菌处理

通过单因素实验确定单一技术最佳杀菌条件, 根据 Box-Behnken 设计原理, 选择各因素的最佳水平为 0 水平, 以活菌数为响应值进行响应面优化实验, 利用软件 Design-Expert 12 分析从而确定最佳杀菌条件。具体响应面实验因素及水平见表 4。

表 4 响应面实验因素及水平(四)
Table 4 Response surface test factors and levels (four)

因素	水平		
	-1	0	1
A 料液比(g/mL)	1	3	5
B 压强/MPa	100	150	200
C 处理时间/min	6	8	10
D ACC/(mg/L)	30	40	50

1.3.7 T 与 SAEW 并行结合处理

通过单因素实验确定单一技术最佳杀菌条件, 根据 Box-Behnken 设计原理, 选择各因素的最佳水平为 0 水平, 以活菌数为响应值进行响应面优化实验, 利用软件 Design-Expert 12 分析从而确定最佳杀菌条件。具体响应面实验因素及水平见表 5。

表 5 响应面实验因素及水平(五)
Table 5 Response surface test factors and levels (five)

因素	水平		
	-1	0	1
A 料液比(g/mL)	1	3	5
E 温度/°C	45	50	55
C 处理时间/min	5.0	7.5	10.0
D ACC/(mg/L)	30	40	50

1.3.8 微生物的检测

微生物测定参照 GB 4789.2—2022《食品微生物学检验 菌落总数测定》。

1.3.9 建立协同项模型

为探明 HP-SAEW 并行联合处理技术在杀菌过程中是否具有增强作用, 强化杀菌效果, 对经过处理的三七鲜切片表面 *E. coli* 菌落总数展开分析。杀菌增强作用通过协同项致死量衡量, 采用如公式(1)、(2)进行计算:

$$I = -\ln N \quad (1)$$

式中: I 为不同技术处理后的增量; N 为不同技术处理后的微生物数量, CFU/g。

$$\Delta I = I_{1+2} - (I_1 + I_2) \quad (2)$$

式中: 1+2 表示两种处理方式并联使用; 1, 2 表示 HP、SAEW、T 3 种不同处理方式之一; ΔI 为协同项。

由式(1)(2)推导可得式(3):

$$\Delta I = -\ln N_{1+2} + \ln N_1 + \ln N_2 \quad (3)$$

关于不同技术处理三七鲜切片表面 *E. coli* 对不同因素的致死量多元二次方程如式(4):

$$Y = a + \beta \sum X_i^2 + \gamma \sum X_i X_j + \delta \sum X_i \quad (4)$$

式中: Y 为协同项 I 值; i, j 为压强(P)、处理时间(t)、ACC (c)、料液比(r)、温度(T)等实验因素。

在两种处理技术并行联合杀菌响应面实验基础上, P 、 t 、 c 、 r 都采用并行联合处理杀菌的因素, 以 ΔI 为响应值, 利用式(1)~(3)中的协同项模型, 采用式(4)多元二次回归方程来拟合因素与响应值之间的关系。

当 $\Delta I > 0$ 时, 说明不同技术并行联合处理后的杀菌效果优于两者单独处理后杀菌效果的和, 即 HP/T-SAEW 并行联合杀菌处理具有“1+1>2”的增强效应; 当 $\Delta I = 0$ 时, 即“1+1=2”, 这意味着两种技术并行联合杀菌, 其效果与二者单独处理效果之和相同, 既没有增强作用也没有拮抗作用。当 $\Delta I < 0$ 时, 不同技术并行联合作用的杀菌效果低于两者单独处理效果之和, 即“1+1<2”, 这意味着并行联合杀菌效果逊于两种单一技术杀菌效果之和, 未实现增强, 具有拮抗作用^[17]。

1.4 数据处理

采用 Excel 2019 软件处理数据, SPSS 25 软件进行显著性分析, 对同一样品进行重复 3 次实验, 显著水平选取 $P < 0.05$, 结果以平均值±标准偏差表示。Origin 2022 软件进行制图, 运用 Design-Expert 12.0 软件进行响应面优化处理。

2 结果与分析

2.1 不同处理方式对三七鲜切片表面 *E. coli* 杀菌效果的影响

2.1.1 HP 对三七鲜切片杀菌效果的影响

由图 1 可知, 对照组三七鲜切片表面 *E. coli* 总数随料液比的增加而减少, 其中料液比为 1:3 (g/mL) 时 *E. coli* 总数下降最为明显, 图中曲线出现拐点, 因此选择料液比 1:1、1:3、1:5 (g/mL) 作为响应面的三水平条件; 处理时间为 6 min 时, 已达半数致死率, 但处理时间至 8 min 后, *E. coli* 总数下降不明显, 图中曲线出现拐点, 因此选择时间 6、8、10 min 为响应面的三水平条件; 不同的压强处理后, 压强为 100 MPa 时活菌数对比常压时显著减

少,说明压强具有一定的杀菌效果,同时样品中 *E. coli* 总数随着压强增大呈减少趋势,但实验过程中需满足一定活菌数的要求,因此选择压强 100、150、200 MPa 为响应面的三水平条件。

2.1.2 HP 对三七鲜切片杀菌效果的响应面实验结果分析

以料液比、处理时间、压强为自变量,三七鲜切片表面 *E. coli* 菌落数为响应值,进行响应面实验,分析数据得出 HP 处理对三七鲜切片杀菌效果的回归方程如下:

$$Y=5.36-0.2475r-0.4537P-0.1087t-0.1225rP+0.0675rt-0.0550Pt+0.0980r^2-0.0695P^2-0.3995t^2$$

对实验数据进行分析可知,该回归模型 $P<0.01$,失拟项 $P=0.1346>0.05$,模型 $R^2=0.9015$,结果表明该模型拟合程度良好,实验误差小,各因素与响应值的线性关系显著,可用于 HP 对三七鲜切片表面杀菌效果实验的预测。通过 F 可知,杀菌效果影响最大的因素为压强,其次为料液比,最后是处理时间。

2.1.3 SAEW 对三七鲜切片杀菌效果的影响

由图 2 可知,当料液比为 1:3 (g/mL)时,菌落数下降程度最明显,且图中曲线出现拐点,当料液比达到一定比例后,SAEW 对三七鲜切片表面微生物杀菌效果不显著,所以选择 1:1、1:3、1:5 (g/mL)作为响应面实验中料液比的三水平条件。SAEW 处理 10 min 后,菌落数无显著差异,

因此选择处理时间 6、8、10 min 为响应面的三水平条件。在 ACC 为 30~60 mg/L 的范围内三七鲜切片表面菌落总数呈减少再增多的趋势,ACC 为 40 mg/L 后杀菌效果不明显,图中曲线出现拐点,因此选择 ACC 为 30、40、50 mg/L 为响应面的三水平条件。

2.1.4 SAEW 对三七鲜切片杀菌效果的响应面实验结果分析

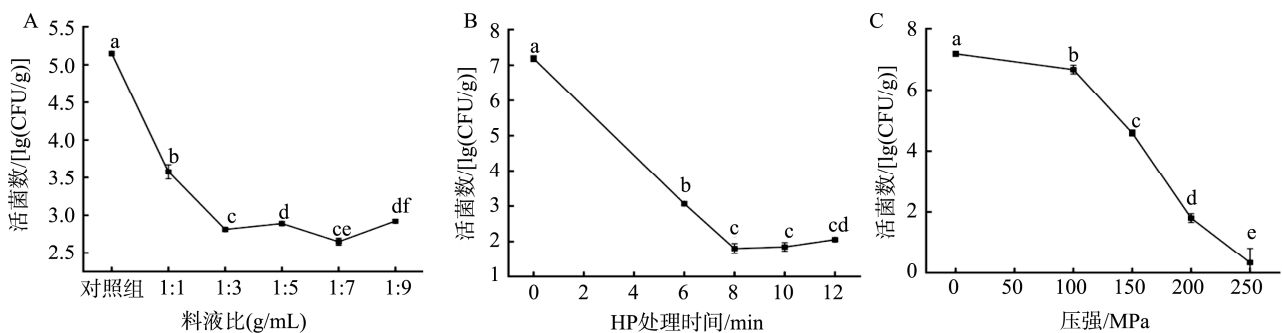
以料液比、处理时间、ACC 为自变量,三七鲜切片表面 *E. coli* 菌落数为响应值,进行响应面实验,分析数据得出 SAEW 处理对三七鲜切片杀菌效果的回归方程如下:

$$Y=6.06-0.1988r-0.0412t-0.2025c+0.0225rt-0.1350rc+0.0350t^2+0.2262r^2+0.0862t^2-0.3162c^2$$

对实验所得数据进行分析可知,该回归模型 $P<0.05$,失拟项 $P=0.2825>0.05$,模型 $R^2=0.8728$,说明该模型拟合程度良好,结果可信度高,可用于预测 SAEW 对三七鲜切片表面 *E. coli* 杀菌效果。根据 F 可知,对杀菌效果起最大影响的因素是 ACC,其次是料液比,影响最小的是时间。

2.1.5 T 对三七鲜切片杀菌效果的影响

由图 3 可知,料液比为 1:3 (g/mL)时 *E. coli* 总数下降最为明显,料液比 1:5 (g/mL)以后 *E. coli* 总数下降不明显,因此选择料液比 1:1、1:3、1:5 (g/mL)作为响应面的三水平条件;



注:不同小写字母表示组间具有显著性差异($P<0.05$),图 2~3 同。

图 1 HP 对三七鲜切片杀菌效果的影响($n=3$)

Fig.1 Effects of HP on the sterilization of *Panax notoginseng* fresh slices ($n=3$)

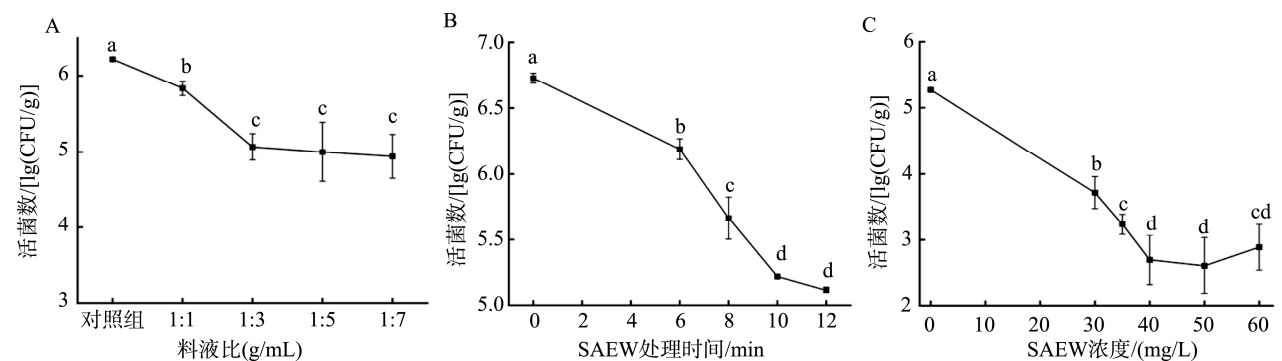
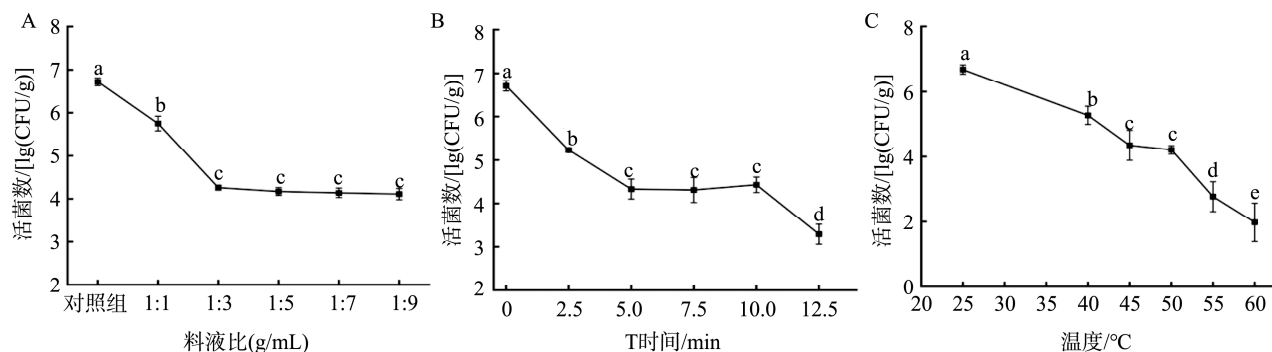


图 2 SAEW 对三七鲜切片杀菌效果的影响($n=3$)

Fig.2 Effects of SAEW on the sterilization of *Panax notoginseng* fresh slices ($n=3$)

图 3 T 对三七鲜切片杀菌效果的影响($n=3$)Fig.3 Effect of T on the sterilization of *Panax notoginseng* fresh slices ($n=3$)

随着 T 时间延长, *E. coli* 总数下降, 处理时间为 5.0 min 时, 已达半数致死率, 图中曲线出现拐点, 因此选择处理时间 5.0、7.5、10.0 min 为响应面的三水平条件; 处理温度在 40~60 °C 范围内, *E. coli* 总数明显下降, 45~50 °C 菌落数下降不明显, 温度为 60 °C 时, *E. coli* 总数趋于 0, 但实验过程中需满足一定活菌数的要求, 因此选择温度 45、50、55 °C 为响应面的三水平条件。

2.1.6 T 对三七鲜切片杀菌效果的响应面实验结果分析

以料液比、处理时间、温度为自变量, 三七鲜切片表面 *E. coli* 菌落数为响应值, 进行响应面实验, 分析数据得出 T 对三七鲜切片杀菌效果的回归方程如下:

$$Y=4.80-0.0738r-0.1263t-0.4250T+0.0900rt+0.0525rT+0.0075tT-0.0395r^2-0.3095t^2+0.1030T^2$$

对实验所得数据进行分析可知, 该回归模型 $P<0.05$, 失拟项 $P=0.8928>0.05$, 模型 $R^2=0.8295$, 说明该模型拟合程度良好, 结果可信度高, 可用于预测 T 对三七鲜切片表面 *E. coli* 杀菌效果。根据 F 可知, 对杀菌效果起最大影响的因素是温度, 其次是时间, 影响最小的是料液比。

2.2 不同并联技术处理对三七鲜切片杀菌效果的响应面实验结果分析及杀菌协同效果分析

2.2.1 HP-SAEW 并联处理对三七鲜切片杀菌效果的响应面实验结果分析

以料液比、处理时间、压强、ACC 为自变量, 三七鲜切片表面 *E. coli* 菌落数为响应值, 进行响应面实验, 分析数据得出 HP-SAEW 处理对三七鲜切片杀菌效果的回归方程如下:

$$Y=4.97-0.2208r-0.6525P-0.0467t-0.3067c-0.3500rP+0.0350rt+0.2875rc+0.1075Pt+0.0700Pc+0.0275tc+0.0650r^2+0.1962P^2-0.3825t^2-0.1013c^2$$

通过对实验数据进行响应面分析, 该回归模型 $P<0.01$, 失拟项 $P=0.1382>0.05$, 模型 $R^2=0.8745$, 说明该模型拟合程度良好, 结果可信度高, 可用于预测 HP-SAEW 并行联合处理对三七鲜切片表面的杀菌效果。根据 F 能够明确, 压强对杀菌效果的影响最为突出, 接着依次是 ACC、料液比, 而处理时间的影响相对最弱。

2.2.2 HP-SAEW 并行联合杀菌协同效果分析

在两种处理技术并行联合杀菌响应面实验基础上, 采用并行联合处理杀菌的因素, 以 ΔI 为响应值, 利用公式 (1)~(3) 中的协同项模型, 结合公式 (4) 计算得到 ΔI 回归方程为:

$$Y=0.0780-0.0308r+0.0542P-0.0417t-0.0067c+0.0525rP+0.0075rt-0.0775rc-0.0350Pt-0.0200Pc-0.0175tc+0.0547r^2+0.0273P^2-0.0865t^2-0.0565c^2$$

通过图 4 模型分析可知, 回归模型 $P<0.05$, 失拟项 $P=0.4623>0.05$, 模型 $R^2=0.7166$, 说明该模型拟合程度良好, 实验结果可信度高。为计算出并联处理的协同区间, 使 $\Delta I>0$, 得到 HP-SAEW 并联处理三七鲜切片的杀菌增强区间 $c \in [27.6 \sim 52.2]$ mg/L, $P \in [98.5 \sim 297.5]$ MPa, $r \in [1.76 \sim 5.88]$ g/mL, $t \in [5.56 \sim 9.48]$ min。极值点为 ACC 为 38.359 mg/L、压强为 198.962 MPa、料液比为 4.914 (g/mL)、处理时间为 7.257 min。

在高压处理下微生物的细胞膜被破坏, 细胞内组分流失, 使其内稳态被破坏^[18-20], 细胞形态发生显著变化, 最终导致细胞死亡^[21-22]。HP 处理中当保压时间逐步延长, 菌株灭活率减缓态势明显, 这意味着细菌细胞群体里不同个体的耐压性存在较大不同^[23]。在并联处理中, HP 加压后, 表现为对微生物细胞膜结构完整性的破坏, 致使其通透性增加, 进而促进电解水中次氯酸跨膜转运至微生物胞内。次氯酸在胞内累积, 对细胞内部的超微结构, 如细胞器、遗传物质等, 以及各类关键酶系, 包括代谢酶、合成酶等, 造成不可逆损伤^[24]。因此 HP-SAEW 并行联合处理具有协同增强效应的可能原因是 HP 施压后, 使其微生物细胞膜通透性增加, 进而促进电解水中次氯酸跨膜转运至微生物胞内, 这种损伤最终导致微生物细胞的生理功能紊乱, 生长繁殖进程受阻, 细胞活力丧失, 甚至死亡。

2.2.3 T-SAEW 并联处理对三七鲜切片杀菌效果的响应面实验结果分析

以料液比、处理时间、处理温度、ACC 为自变量, 三七鲜切片表面 *E. coli* 菌落数为响应值, 进行响应面实验,

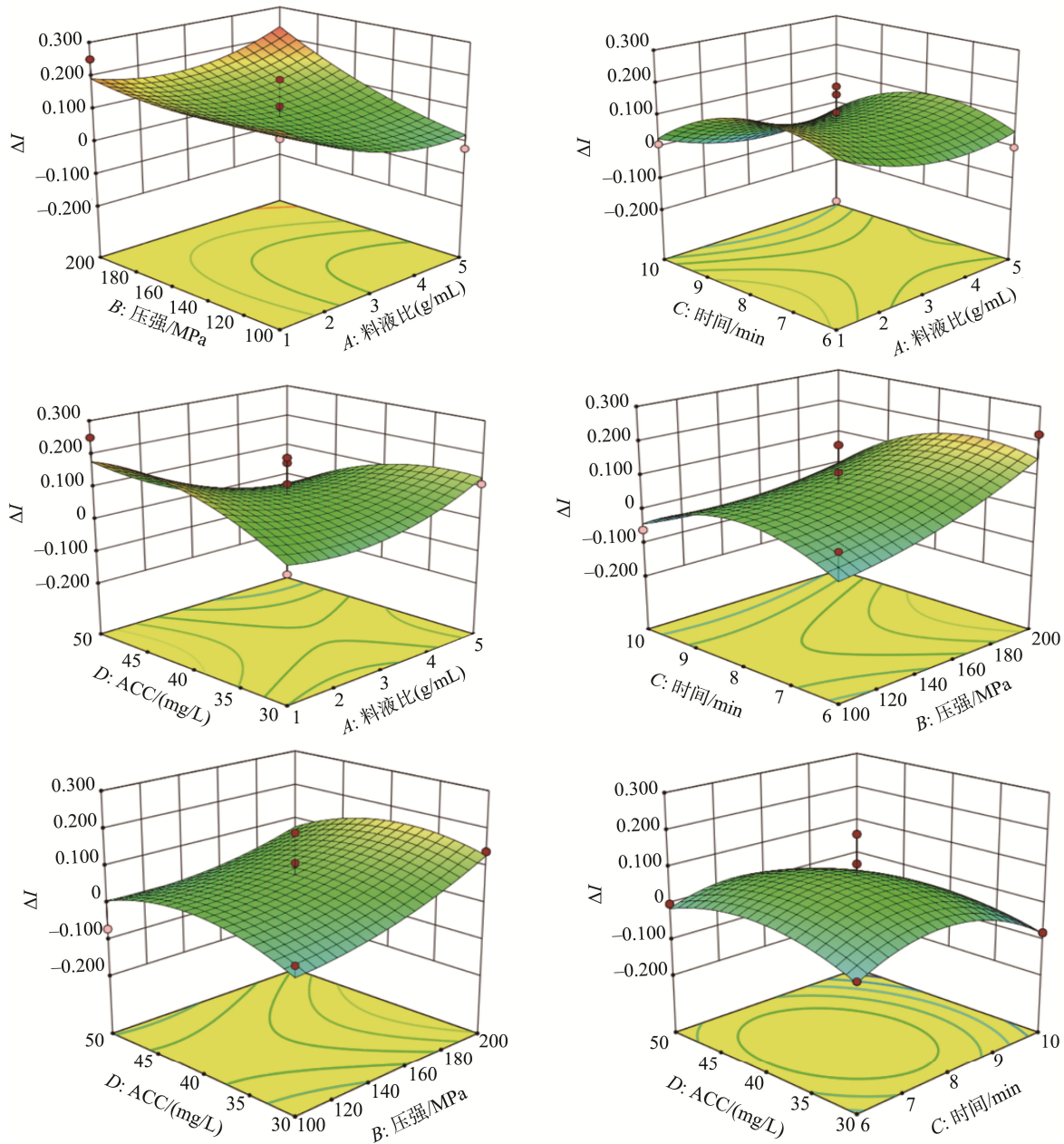


图 4 HP-SAEW 并行联合处理各因素对三七鲜切片杀菌协同效果响应面图

Fig.4 Response surface diagram of the effects of HP-SAEW factors on the hygienic synergistic effects of *Panax notoginseng* fresh slices

分析数据得出 T-SAEW 处理对三七鲜切片杀菌效果的回归方程如下: $Y=4.63-0.1008r-0.0250t-0.5258T-0.0683c-0.2900rt-0.1100rT-0.2325rc+0.1400tT+0.6750tc-0.4325Tc-0.2516r^2-0.0466T^2-0.5728t^2-0.1903c^2$

通过对实验数据进行响应面分析, 该回归模型 $P<0.01$, 失拟项 $P=0.3773>0.05$, 模型 $R^2=0.7970$, 说明该模型拟合程度良好, 结果可信度高, 可用于预测 T-SAEW 并行联合处理对三七鲜切片表面的杀菌效果。根据 F 可以明确, 温度对杀菌效果的影响最为突出, 接着依次是料液比、ACC, 而时间的影响相对最弱。不同处理方法均能明显降低三七鲜切片表面 *E. coli* 数量, 说明 T-SAEW 并行联

合处理三七鲜切片均有杀灭 *E. coli* 的效果。针对三七鲜切片, 并行联合处理的杀菌效果强于单独一种技术, 两种杀菌技术共同作用于靶标物质, 可产生“协同效应”。

2.2.4 T-SAEW 并行联合杀菌协同效果分析

如 2.2.2 中, 利用协同项模型, 结合公式计算得到 ΔI 回归方程为:

$$Y=-0.0280-0.0368r-0.0283t+0.0227T-0.0197c+0.0805rt+0.0352rT+0.0332rc+0.0065tT-0.1650tc+0.0927Tc+0.1080r^2+0.0623t^2-0.0178T^2-0.0227c^2$$

通过图 5 模型分析可知, 回归模型 $P<0.05$, 失拟项 $P=0.7103>0.05$, 模型 $R^2=0.7494$, 说明该模型拟合程度良

好, 实验结果可信度高。为计算出并行联合处理的协同区间, 使 $\Delta I > 0$, 得到 T-SAEW 并行联合处理三七鲜切片的杀菌增强区间 $c \in [25.44 \sim 46.88]$ mg/L, $T \in [39.78 \sim 53.85]$ °C, $r \in [2.27 \sim 4.42]$ g/mL, $t \in [5.02 \sim 9.84]$ min。极值点为 ACC 为 46.067 mg/L、温度为 47.708 °C、料液比为 2.980 (g/mL)、处理时间 5.261 min。

热杀菌主要是利用温度使菌体氢键断裂, 蛋白质、核酸、酶等变性失活, 而使细菌死亡。T-SAEW 并行联合处

理时温度对微生物细胞膜结构破坏, 使其通透性增加, 进而促进电解水中次氯酸跨膜转运至微生物胞内, 加快微生物的死亡^[25]。在相关研究中发现 SAEW 联合中温处理方式对微生物有较好的杀菌效果, 联合处理具有明显协同效应^[26-27], 这一研究结果与本研究结果相似, 因此 T-SAEW 并行联合处理具有协同增强效应的原因是高温可能导致细胞膜功能受损, 使其小分子物质泄漏, SAEW 中次氯酸可以更快进入细胞中发挥作用, 增强了灭菌效果。

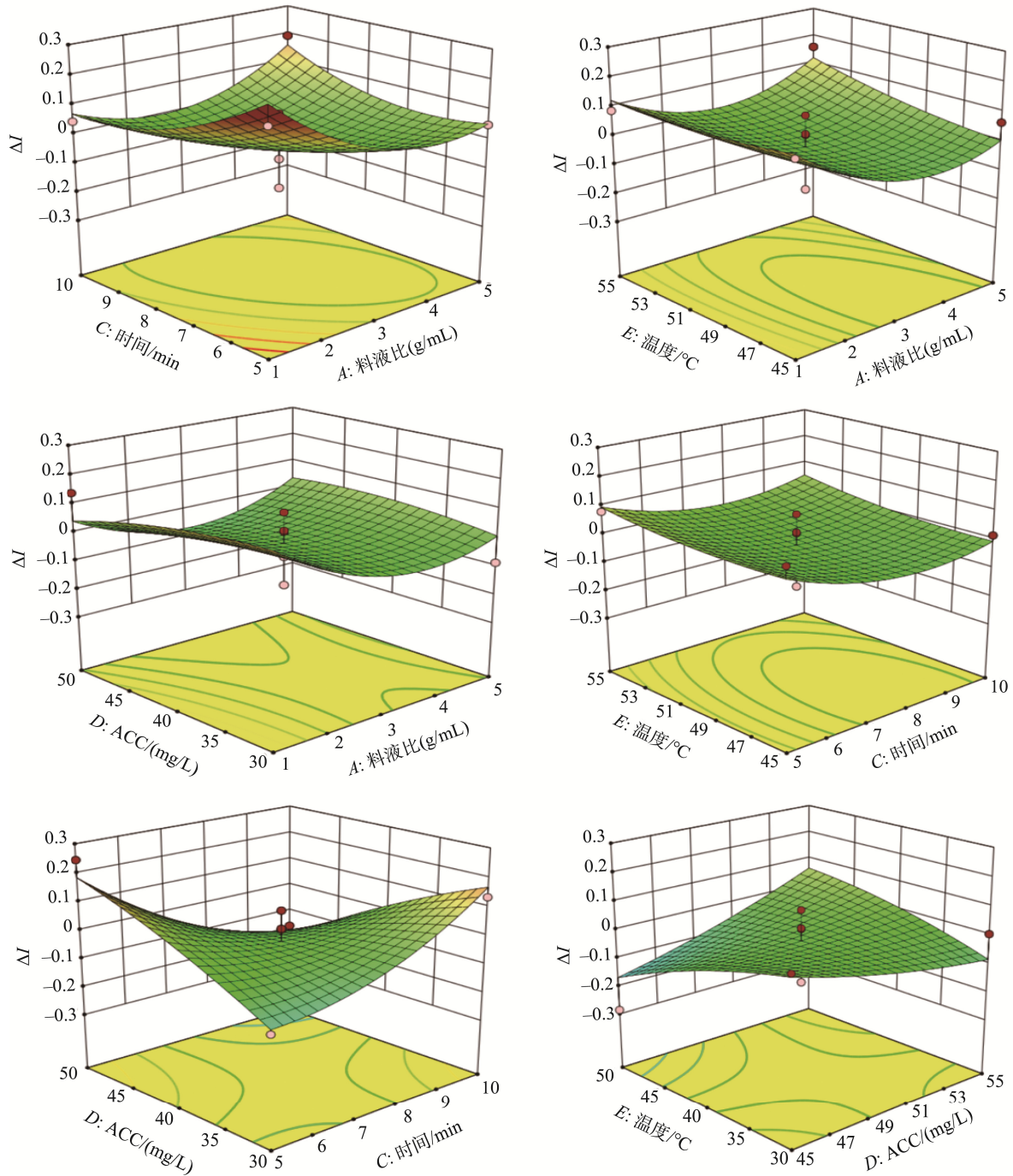


图 5 T-SAEW 并行联合处理各因素对三七鲜切片杀菌协同效果响应面图

Fig.5 Response surface diagram of the effects of T-SAEW factors on the hygienic synergistic effect of *Panax notoginseng* fresh slices

2.3 不同并行联合技术处理协同区间的验证

2.3.1 不同并行联合技术处理协同区间及增强效应验证

由响应面回归模型公式求出不同并行联合杀菌处理的协同区间,在极值点和协同区间内随机挑选6组条件进行验证实验,结果如表6~7。

表6 HP-SAEW 验证结果
Table 6 Validation results of HP-SAEW

实验号	料液比 (g/mL)	压强 /MPa	处理时间 /min	ACC /(mg/L)	协同项	
					预测值	实验值
1	1:3	150	7	50.18	0.16	0.17
2	1:5	100	8	36.16	0.19	0.16
3	1:4	100	8	36.16	0.21	0.25
4	1:4	150	7	50.18	0.24	0.23
5	1:3	150	8	30.85	0.13	0.14
6	1:5	197	8	35.02	0.16	0.17

表7 T-SAEW 验证结果
Table 7 Validation results of T-SAEW

实验号	料液比 (g/mL)	温度 /°C	处理时间 /min	ACC /(mg/L)	协同项	
					预测值	实验值
1	1:3	41	5	28.18	0.15	0.14
2	1:5	46	9	32.45	0.26	0.27
3	1:4	45	5	46.07	0.26	0.28
4	1:4	40	7	28.18	0.16	0.17
5	1:3	45	8	30.85	0.19	0.18
6	1:2	47	5	46.07	0.29	0.28

对验证实验中协同项的预测值和实验值进行独立样本 t 检验, $P>0.05$, 说明预测值和实验值之间无显著性差异, 实验结果真实可靠。通过验证实验证明经多元二次回归方程计算得出的协同区间和极值点真实存在, 且协同项 $\Delta I>0$ 。同时表明在协同区间内两种技术并行联合处理后的

杀菌效果明显比其二者单独处理后杀菌效果的和更好, 即并行联合杀菌技术具有“1+1>2”的增强效果和协同效应。

研究发现并行联合技术作用在食品中能显著降低其表面的微生物菌落总数, 并且有良好的保鲜效果, 同时在保障鲜切产品食用安全上, 展现出了非常可观的前景^[9-11,28-30]。为进一步探究并行联合作用在一定加工参数区间内是否存在协同增强效应, 本研究通过建立协同项模型, 引用协同项 ΔI 作为协同效应的判定依据。通过建立协同项模型, 采用计算方式来量化分析并行联合技术对 *E. coli* 的灭菌效果, 从而更深入地明晰并行联合技术作用方式与作用效果这两个概念的差异。本研究采用 HP/T-SAEW 并行联合处理三七鲜切片表面 *E. coli*, 研究发现 HP/T-SAEW 并行联合处理均能更有效地减少 *E. coli* 的数量, 即 HP/T-SAEW 并行联合杀菌处理具有“1+1>2”的增强效应。

2.3.2 不同技术处理三七鲜切片表面菌落总数验证实验

三七鲜切片在最佳杀菌条件下进行细菌总菌落数验证实验, 结果如表8。

对验证实验中未处理组与不同技术处理组的活菌数进行方差齐性检验和多重比较。与未处理组比较, 不同处理技术对三七鲜切片中菌落总数有显著的抑制作用 ($P<0.05$); 不同技术并行联合处理均能更有效地减少菌落数, 在协同区间内, 并行联合杀菌处理具有“1+1>2”的增强效应; T-SAEW 并行联合技术较 HP-SAEW 并行联合技术对微生物的抑制作用更为明显。

本研究表明: HP-SAEW、T-SAEW 并行联合处理对食品表面微生物的杀灭作用表现出良好的效果, 在微生物控制成效上, 本研究得到的结果与 HP-SAEW 联合处理虾仁^[28]、水产品^[31], T-SAEW 联合处理苹果^[13]、米线^[14]的结果一致。这些结果显示, 在协同区间内, 并行联合处理具备以低能耗、较小加工参数及更低浓度达成理想杀菌效果的能力。延缓腐败过程, 从而延长贮藏时间, 在控制果蔬微生物污染具有巨中大潜力。

表8 三七鲜切片验证结果
Table 8 Validation results of *Panax notoginseng* fresh slices

实验组	料液比(g/mL)	压强/MPa	处理时间/min	ACC/(mg/L)	温度/°C	活菌数/(lg CFU/g)
未处理组	0	0.1	0	0	25	4.67±0.23 ^a
HP	1:5	200	7	0	25	2.58±0.47 ^f
SAEW	1:5	0.1	7	40	25	3.31±0.67 ^e
SAEW	1:2	0.1	5	46	25	3.97±0.74 ^b
T	1:2	0.1	5	0	48	3.17±0.34 ^e
HP-SAEW	1:5	200	7	40	25	1.88±1.13 ^g
T-SAEW	1:2	0.1	5	46	48	1.35±1.06 ^h

注: 同列不同小写字母表示组间活菌数具有显著差异 ($P<0.05$)。

3 结 论

通过 HP、SAEW、T、HP-SAEW 和 T-SAEW 并行联合技术分别处理三七鲜切片, 比较不同并行联合技术对三七鲜切片表面 *E. coli* 的杀菌效果及协同效应, 得出以下结论:

与单一技术处理相比, 并行联合技术对三七鲜切片表面微生物杀菌效果显著提高, 同时并行联合作用在特定的加工参数区间内存在着协同增强效应。结果表明并行联合加工参数在一个区间内, 以 \ln 对数值表征, 存在“1+1>2”的加强区域, 两种技术并行联合处理有协同效应, 杀菌效果满足“1+1>2”, 以加强项为响应值, 进行二次响应面, 借助模型能够推导计算出加强区间, 进而开展验证实验。在该区间内, 可以用低能耗、较小的加工参数, 更低的浓度来获得理想的杀菌效果。

同时, 通过比较 HP-SAEW 和 T-SAEW 两种并行联合技术对三七鲜切片表面 *E. coli* 的杀菌效果及协同效应, 发现 HP-SAEW 和 T-SAEW 并行联合技术均能显著抑制三七鲜切片表面微生物的生长, 但 T-SAEW 并行联合技术抑菌效果更好, 而 HP-SAEW 是一种非热杀菌技术的联合使用, 因此两种并行联合处理方式均可用于实际生产过程中。

参考文献

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典[M]. 一部. 北京: 中国医药科技出版社, 2020.
Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China [M]. A. Beijing: China Medical Science and Technology Press, 2020.
- [2] 詹鹏, 韦美滕, 徐波, 等. 基于产业链的我国三七产业发展现状与对策[J]. 北方园艺, 2021(14): 158–164.
ZHANG P, WEI MT, XU B, *et al.* Research on the development status and countermeasures of China's *Panax notoginseng* industry based on the industrial chain [J]. Northern Horticulture, 2021(14): 158–164.
- [3] 董艳. 药食两用三七防腐保鲜技术的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2016.
DONG Y. Research on preservation technology of medicinal and edible *Panax notoginseng* [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2016.
- [4] SAITO K, NOZAWA Y, MINAMITANI Y, *et al.* Development of nonthermal sterilization treatment system without impacting to enzyme in vegetable drink by pulsed electric field [J]. Electronics and Communications in Japan, 2018, 101(4): 85–92.
- [5] SUN Y, ZHANG LL, ZHANG H, *et al.* Effects of two sterilization methods on the taste compositions of sweet and sour spare ribs flavor [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2021: 104143. DOI: 10.1016/j.jfca.2021.104143
- [6] OZCAN T, BAYIZIT AA, YILMAZ-ERSAN L, *et al.* Effects of high-pressure technology on the functional properties of milk and fermented milk products [J]. Journal of Life Sciences, 2017, 11(3): 125–132.
- [7] HAO J, LI H, WAN Y, *et al.* Combined effect of acidic electrolyzed water (ACEW) and alkaline electrolyzed water (ALEW) on the microbial reduction of fresh-cut cilantro [J]. Food Control, 2015, 1: 50699–50704.
- [8] MAKSIM R, KANZA S, ADNAN K, *et al.* Application of electrolyzed water in the food industry: A review [J]. Applied Sciences, 2022, 12(13): 6639.
- [9] FENG YB, SUO K, ZHANG Y, *et al.* Ultrasound synergistic slightly acidic electrolyzed water treatment of grapes: Impacts on microbial loads, wettability, and postharvest storage quality [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 103106751. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2023.106751
- [10] TONG SN, LIU R, WANG W, *et al.* Synergistic effect of ultrahigh pressure and allicin on gel properties, flavor characteristics, and myosin structure of the obturator muscle of the scallop (*Patinopecten yessoensis*) [J]. Journal of Food Science, 2023, 88(7): DOI: 10.1111/1750-3841.16594
- [11] 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]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 338–344.
ZHANG QT, LIN SL, ZHU SM, *et al.* Combined effect of high pressure and slightly acidic electrolyzed water on sterilization of fresh-cut fruits and vegetables [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 338–344.
- [12] 高晴, 刘培红, 冉苒, 等. 微酸性电解水-超声波并行联合处理对鲜切生菜表面大肠杆菌杀菌效果的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(11): 210–216.
GAO Q, LIU PH, RAN R, *et al.* Bactericidal effect of combined slightly acidic electrolyzed water and ultrasonic treatment against *Escherichia coli* on fresh-cut lettuce [J]. Food Science, 2024, 45(11): 210–216.
- [13] 庞文婷, 李思佳, 尹家辉, 等. 中温微酸性电解水并联对鲜切苹果贮藏品质的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2023, 38(6): 997–1005.
PANG WT, LI SJ, YIN JH, *et al.* Effect of medium temperature slightly acidic electrolyzed water in parallel on storage quality of fresh-cut apple [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2023, 38(6): 997–1005.
- [14] 李婧文. T-SAEW 并联杀菌对云南鲜湿米线品质的影响及货架期分析[D]. 昆明: 云南农业大学, 2023.
LI JW. Effect of T-SAEW parallel sterilization on the quality of Yunnan fresh wet rice noodles and its shelf life analysis [D]. Kunming: Yunnan Agricultural University, 2023.
- [15] CARLOS JN, CINTIA RM. A new simple and practical method for establish available chlorine [J]. Analytical Chemistry, 2013, 12(11): 415–422.
- [16] 和劲松, 祁凡雨, 叶章颖, 等. 微酸性电解水储藏和杀菌过程中有效氯衰减的动力学模型[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 263–270.
HE JS, QI FY, YE ZY, *et al.* Decay kinetics model of available chlorine in slightly acidic electrolyzed water in storage and disinfection process [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(15): 263–270.
- [17] 李坤, 张俊磊, 申羽婷, 等. 微酸性电解水和超高压并行联合对三七块茎表面大肠杆菌杀菌效果研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(1): 223–233.
LI K, ZHANG JL, SHENG YT, *et al.* Study on synergistic effects of slightly acidic electrolyzed water and ultra-high pressure parallel on

- Escherichia coli* on the surface of *Panax notoginseng* tubers [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2025, 16(1): 223–233.
- [18] 张艳, 吴银明, 盛家武, 等. 鲜花椒膏的开发及其杀菌工艺研究[J]. *食品与发酵科技*, 2024, 60(1): 99–104.
ZHANG Y, WU YM, SHENG JW, *et al.* Development of zanthoxylum semisolid seasoning and its sterilization process [J]. *Food and Fermentation Science & Technology*, 2024, 60(1): 99–104.
- [19] FARKAS FD, HOOVER GD. High pressure processing [J]. *Journal of Food Safety*, 2000, 65(s8): 47–64.
- [20] CAMPOS F, CRISTIANINI M. Inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* and *Lactobacillus plantarum* in orange juice using ultra high-pressure homogenisation [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2006, 8(2): 226–229.
- [21] KEMAL A, CHRISTIAN H, RUDI FV, *et al.* Aspects of high hydrostatic pressure food processing: Perspectives on technology and food safety [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2021, 20(4): 3225–3266.
- [22] 崔燕, 刘韩欣, 朱麟, 等. 超高压杀菌对大黄鱼理化性质及滋味、风味的影响[J]. *食品工业科技*, 2025, 46(5): 44–55.
CUI Y, LIU HX, ZHU L, *et al.* Effect of high hydrostatic pressure sterilization on the physicochemical properties, taste, and flavor of large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2025, 46(5): 44–55.
- [23] PATTERSON MF, QUINN M, SIMPSON R, *et al.* Sensitivity of vegetative pathogens to high hydrostatic pressure treatment in phosphate-buffered saline and foods [J]. *Journal of Food Protection*, 1995, 58(5): 524–529.
- [24] SUN JP, WANG M, LIU HQ, *et al.* Acidic electrolysed water delays browning by destroying conformation of polyphenoloxidase [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(1): 147–153.
- [25] 赵德锐, 李凌飞, 和劲松. 微酸性电解水联合中温对大肠杆菌杀菌效果研究[Z]. 2016.
ZHAO DK, LI LF, HE JS. Effect of sterilization of *Escherichia coli* treated with slightly acidic electrolyzed water combined with mild heat [Z]. 2016.
- [26] PARK J, KIM H, OH D. Quality enhancement of Kimchi by pre-treatment with slightly acidic electrolyzed water and mild heating during storage [J]. *Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition*, 2016, 45(2): 269–276.
- [27] YAN P, CHELLIAH R, JO HK, *et al.* Structural insights on anti-biofilm mechanism of heated slightly acidic electrolyzed water technology against multi-resistant *Staphylococcus aureus* biofilm on food contact surface [J]. *Food Science and Human Wellness*, 2024, 13(3): 1556–1566.
- [28] 杜苏萍, 张昭寰, 娄阳, 等. 酸性电解水结合超高压技术对虾仁中副溶血性弧菌风险降低的研究[J]. *现代食品科技*, 2016, 32(11): 146–154.
DU SP, ZHANG ZH, LOU Y, *et al.* Risk reduction assessment of combined acidic electrolyzed water and high hydrostatic pressure effects on *Vibrio parahaemolyticus* in shelled shrimp [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2016, 32(11): 146–154.
- [29] ZHU XL, YAN H, CUI ZK, *et al.* Ultrasound-assisted blue light killing *Vibrio parahaemolyticus* to improve salmon preservation [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2023, 95: 106389.
- [30] LI FF, ZHONG Q, KONG BH, *et al.* Synergistic effect and disinfection mechanism of combined treatment with ultrasound and slightly acidic electrolyzed water and associated preservation of mirror carp (*Cyprinus carpio* L.) during refrigeration storage [J]. *Food Chemistry*, 2022, 386: 132858.
- [31] 蓝蔚青, 张炳杰, 谢晶. 超高压联合其他保鲜技术在水产品中应用的研究进展[J]. *高压物理学报*, 2022, 36(2): 197–204.
LAN WQ, ZHANG BJ, XIE J. Research progress on the application of high pressure combined with other preservation technologies in aquatic products [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2022, 36(2): 197–204.

(责任编辑: 于梦娇 韩晓红)