

超高压处理对黄金茶饮料微生物指标、理化指标及香气成分的影响

王 涵¹ 姚茂君¹ 曹英姿¹ 罗凯琨¹ 谭永生²

(1. 吉首大学化学化工学院, 湖南 吉首 416000; 2. 湘西自治州汇丰农业开发有限公司, 湖南 吉首 416000)

摘要: [目的] 针对传统热杀菌对黄金茶饮料品质的负面影响, 系统评估超高压处理对黄金茶饮料微生物灭活、理化特性及挥发性香气成分的综合影响, 并优化其非热力加工工艺。[方法] 采用不同压力—时间组合对黄金茶饮料进行超高压处理, 监测微生物指标, 构建微生物失活动力学模型; 分析各理化指标(茶多酚、游离氨基酸、可溶性总糖、pH 及色泽)的变化, 并进行感官评分以确定最佳工艺参数; 同时利用顶空固相微萃取—气相色谱—质谱联用技术(HS-SPME-GC-MS)解析超高压处理前后挥发性香气成分的演变规律。[结果] Weibull 模型能更准确地描述微生物的非对数失活过程。在 400 MPa、5 min 的优化条件下, 菌落总数降至 (8 ± 2) CFU/mL, 完全符合国家饮料卫生标准, 且感官综合评分最高, 能最大程度保留产品色泽与滋味。香气分析表明, 超高压处理使部分花香与清香物质如壬醛(下降 86.2%)、芳樟醇(下降 65.3%)减少, β -月桂烯等熟甜物质增加, 香气由“清新花香型”转向“熟甜型”, 且未产生典型热致异味。[结论] 超高压处理(400 MPa、5 min)可有效灭活黄金茶饮料中的微生物, 较好地保持茶饮料的香气协调性, 避免风味失真, 是一种可行的非热力加工技术。

关键词: 超高压杀菌; 黄金茶饮料; 微生物指标; 理化指标; 香气成分; Weibull 模型

Effects of high-pressure processing on microbial indicators, physicochemical indicators, and aroma components of golden tea beverage

WANG Han¹ YAO Maojun¹ CAO Yingzi¹ LUO Kaikun¹ TAN Yongsheng²

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Jishou University, Jishou, Hunan 416000, China;

2. Xiangxi Autonomous Prefecture Hui Feng Agricultural Development Co., Ltd., Jishou, Hunan 416000, China)

Abstract: [Objective] To systematically evaluate the comprehensive effects of high-pressure processing (HPP) on microbial inactivation, physicochemical properties, and volatile aroma compounds of golden tea beverage, and to optimize a non-thermal processing technique, in response to the negative impact of conventional thermal sterilization on its quality. [Methods] Golden tea beverage was treated under different pressure-time combinations using HPP. Microbial indicators were determined, and microbial inactivation kinetic models were established. Changes in physicochemical properties (tea polyphenols, free amino acids, total soluble sugars, pH, and color) were analyzed, and sensory evaluation was conducted to determine the optimal processing parameters. Meanwhile, volatile aroma compounds before and after HPP were characterized using headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS). [Results] The Weibull model more accurately described the non-log-linear inactivation behavior of microorganisms. Under the optimal condition (400 MPa for 5 min), the total viable count decreased to (8 ± 2) CFU/mL, fully meeting national beverage hygiene standards, while achieving the highest overall sensory score and maximizing the retention of color and taste. Aroma analysis showed that HPP reduced certain floral and fresh compounds, such as nonanal (decreased by 86.2%) and linalool (decreased by 65.3%), while increasing ripe-sweet

基金项目: 湖南省重点研发计划项目(编号: 2022NK2036); 湖南省中央引导地方科技发展资金项目(编号: 2024ZYQ164)

通信作者: 姚茂君(1968—), 男, 吉首大学教授, 硕士。E-mail: yaomaojun@126.com

收稿日期: 2026-01-02 改回日期: 2026-03-10

引用格式: 王涵, 姚茂君, 曹英姿, 等. 超高压处理对黄金茶饮料微生物指标、理化指标及香气成分的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(3): 158-166.

Citation: WANG Han, YAO Maojun, CAO Yingzi, et al. Effects of high-pressure processing on microbial indicators, physicochemical indicators, and aroma components of golden tea beverage[J]. Food & Machinery, 2026, 42(3): 158-166.

compounds such as β -myrcene. The aroma profile shifted from a "fresh floral" type to a "ripe-sweet" type, without generating typical heat-induced off-flavors. [Conclusion] HPP (400 MPa for 5 min) effectively inactivated microorganisms in golden tea beverage, better maintained aroma harmony, and avoided flavor distortion, demonstrating its feasibility as a non-thermal processing technology.

Keywords: high-pressure processing (HPP); golden tea beverage; microbial indicators; physicochemical indicators; aroma components; Weibull model

茶是世界上三大最受欢迎的非酒精饮品之一,因其独特的风味与健康属性日益受到广泛关注。中国是茶叶的原产国与主要生产国。黄金茶原产于湖南省湘西自治州保靖县葫芦镇黄金村,高氨基酸含量的特点赋予了其独特的风味特征,更形成了“鲜、香、翠、浓”的品质特点,素有“一两黄金一两茶”的称誉^[1-2]。冲泡后汤色黄绿明亮,具有独特的自然花香或栗香,滋味浓醇鲜爽,具备开发为高端茶饮料的良好基础。

近年来,随着社会生活方式的转变及健康意识的提升,瓶装纯茶饮料市场迅速增长;早在2017年,中国市场消费茶饮量就已居全球第一。目前,传统的饮料杀菌方式多为高温巴氏杀菌和超高温瞬时灭菌等技术^[3],高温杀菌方式易引发一系列热裂解、氧化还原反应,致使其中热敏性成分以及挥发性风味物质发生降解或转化,进而对饮料的色泽、风味、营养产生负面影响,导致饮料综合品质下降^[4]。因此,如何在实现有效杀菌的同时,尽可能地保持茶饮料原有的风味、色泽及热敏性营养元素,成为产业技术的关键课题。超高压杀菌技术(HPP)作为一种非热力杀菌技术,能较好地保持食品的营养品质、质构、风味及色泽^[5]。目前该技术在果汁等食品中已有应用^[6-7],但在茶饮料这类产品中的应用仍显不足。有关超高压处理对瓶装茶饮料的杀菌动力学、理化稳定性及特征香气成分影响的系统研究仍较为缺乏。

研究拟以瓶装黄金茶饮料为对象,系统探讨不同超高压处理条件对其微生物指标、理化指标及香气成分的影响,通过构建杀菌动力学模型以阐明微生物灭活的动力学规律,并借助顶空固相微萃取—气相色谱—质谱联用(HS-SPME-GC-MS)技术解析香气演变特征,以期为黄金茶饮料的非热力加工提供理论依据与技术参考。

1 材料与与方法

1.1 材料与试剂

黄金茶:2025年4月中旬采摘,湘西自治州汇丰农业开发有限公司;

HP-5MS 石英毛细管色谱柱:30 m×0.25 mm, 0.25 μ m,安捷伦科技有限公司;

50/30 μ m DVB/CAR/PDMS 固相微萃取头:美国 Supelco 公司;

顶空进样瓶:15 mL,安谱实验科技股份有限公司;

平板计数琼脂、结晶紫中性胆盐琼脂、孟加拉红琼

脂、煌绿乳糖胆盐肉汤:北京奥博星生物技术有限责任公司;

癸酸乙酯标准品:纯度99%,美国 Sigma-Aldrich 公司;

葡萄糖:分析纯,中国医药集团有限公司;

茶氨酸、没食子酸(GA):纯度>98%,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

福林酚、水合茚三酮、茴酮、乙酸乙酯:分析纯,上海麦克林生化科技股份有限公司。

1.2 主要仪器设备

超高压设备:L2-600/2型,华泰森森生物技术有限公司;

紫外—可见分光光度计:Cary 3500型,安捷伦科技有限公司;

气相色谱—质谱联用仪:7890A-5975C,安捷伦科技有限公司;

色差仪:YS2580型,深圳市三恩驰科技有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 黄金茶饮料制备 通过前期对黄金茶萃取条件的探究,确定黄金茶饮料制备工艺为茶水质量体积比1:175 (g/mL),萃取水温25 $^{\circ}$ C,萃取时间1 h,过滤(采用0.45 μ m微孔滤膜过滤),置于PET瓶中冷藏备用。

1.3.2 超高压处理方法 分别在不同超高压压力(0.1, 100, 200, 300, 400, 500 MPa;保压时间10 min)和超高压时间(0, 5, 10, 15, 20, 25 min;处理压力300 MPa)下进行超高压处理。将处理后的样品分别进行微生物、茶多酚、游离氨基酸、可溶性总糖、pH等指标的检测以及感官品评。

1.3.3 杀菌动力学研究 在超高压处理过程中,取处理时间为0, 5, 10, 15, 20, 25 min的样品测定菌落总数。将微生物存活数($\lg N$)与处理时间(t)进行拟合,分别采用一级动力学模型和Weibull模型进行数据分析,以确定微生物失活的动力学参数。

依据模型预测达到国家卫生标准(GB 7101—2015)所需的处理时间,结合感官评分变化趋势,筛选出5组压力—时间条件进行试验验证,旨在综合评估不同处理条件下的杀菌效果、理化指标与感官品质,从而确定黄金茶饮料的最佳超高压杀菌工艺参数。

1.3.4 微生物检测

- (1) 菌落总数:按 GB 4789.2—2022 执行。
- (2) 霉菌和酵母菌:按 GB 4789.15—2016 执行。
- (3) 大肠杆菌:按 GB 4789.3—2025 执行。

1.3.5 理化指标检测

- (1) 茶多酚含量:按 GB/T 8313—2018 执行。
- (2) 游离氨基酸含量:按 GB/T 8314—2013 执行。
- (3) 可溶性总糖含量:采用蒽酮—硫酸法。
- (4) pH:采用 pH 计。
- (5) 色泽:采用色差仪。

1.3.6 感官品评 由 5 名审评专家依据 GB/T 23776—2018 中的“表 B.1 绿茶品质评语与各品质因子评分表”,分别对冷泡茶的汤色、香气和滋味 3 项指标进行独立评分,以汤色、香气、滋味分别占权重的 20%, 35%, 45% 计算不同条件下的综合评分,满分 100 分。

1.3.7 HS-SPME-GC-MS 分析

(1) 样品处理:取 5 mL 黄金茶饮料置于 15 mL 顶空瓶中,加入 5 μ L 癸酸乙酯内标(100 mg/L)和 0.5 g NaCl,置于固相萃取装置上于温度 60 $^{\circ}$ C 下平衡 10 min;将手动 SPME 装置插入顶空瓶中,推出萃取头,吸附 30 min 后将纤维插入进样口,230 $^{\circ}$ C 解吸 8 min。

(2) GC 分析:选用 HP-5MS 石英毛细管色谱柱(30 m \times 0.25 mm, 0.25 μ m);载气为高纯氦气,流量 1 mL/min,柱温 40 $^{\circ}$ C,进样口温度 230 $^{\circ}$ C,不分流进样;升温程序:初始温度 40 $^{\circ}$ C,保持 2 min,以 5 $^{\circ}$ C/min 升至 85 $^{\circ}$ C 保持 2 min,然后以 2 $^{\circ}$ C/min 升至 110 $^{\circ}$ C 保持 2 min,再以 7 $^{\circ}$ C/min 升至 160 $^{\circ}$ C 保持 10 min,最后以 7 $^{\circ}$ C/min 升至 220 $^{\circ}$ C 保持 8 min;总运行时间为 51.21 min^[8]。

(3) MS 分析:选用 EI 离子源,电子能量 70 eV;接口温度 230 $^{\circ}$ C;离子源温度 230 $^{\circ}$ C;四极杆温度 150 $^{\circ}$ C;扫描方式为全扫描;质量扫描范围 50~550 aum。

(4) 定性方法:以 GC-MS 自带的 NIST11.L 标准谱库进行检索,保留相似度>70 的化合物,结合相关文献报道对挥发性成分进行定性。

(5) 定量方法:采用癸酸乙酯内标法^[9],通过计算各组分的峰面积和内标(癸酸乙酯)的峰面积之比进行定量,按式(1)计算香气成分质量浓度。

$$A = \frac{S_i \times C_0 \times V_0}{S_0 \times V_i} \quad (1)$$

式中:

- A——香气成分质量浓度, μ g/L;
- S_i ——目标物峰面积;
- C_0 ——加入的内标质量浓度, mg/L;
- V_0 ——加入的内标溶液体积, μ L;
- S_0 ——内标物峰面积;
- V_i ——样品的添加量, mL。

1.4 数据处理

所有指标检测均重复测定 3 次,取平均值并计算相对偏差;Excle、IBM SPSS Statistics 26、Origin 2021 等软件用于试验数据的统计分析及相关图表的制作与处理;使用 GInaFIT v1.6 软件计算模型参数^[10]。

2 结果分析

2.1 超高压处理对黄金茶饮料品质的影响

2.1.1 超高压压力对微生物指标和理化指标的影响 由表 1 可知,随着超高压压力的增大,黄金茶饮料中的菌落总数、霉菌及酵母菌数量均呈降低趋势。超高压压力为 300 MPa 时,黄金茶饮料的菌落总数、大肠菌群、霉菌和酵母菌指标均符合 GB 7101—2015《食品安全国家标准 饮料》的要求(其中菌落总数 \leq 100 CFU/mL、大肠菌群 \leq 1 MPN/mL、霉菌和酵母菌数 \leq 20 CFU/mL),表明超高压处理在此条件下能有效杀灭微生物。这与 Hayashi^[11]、McKay 等^[12]报道的压力灭活效果一致。在超高压杀菌过程中,压力可作用于细胞膜的磷脂双分子层结构,使该结构压缩,造成蛋白质变性及相关酶系失活,从而导致菌落总数、霉菌和酵母菌数量的对数级下降^[4]。该结果表明,超高压杀菌技术对黄金茶饮料有良好的杀菌效果。

表 1 超高压压力对微生物指标的影响[†]

压力/ MPa	菌落总数/ (CFU \cdot mL ⁻¹)	大肠菌群/ (MPN \cdot mL ⁻¹)	霉菌和酵母菌/ (CFU \cdot mL ⁻¹)
0.1	1 770 \pm 270 ^a	ND	521 \pm 19 ^a
100	290 \pm 11 ^b	ND	117 \pm 6 ^b
200	111 \pm 12 ^{bc}	ND	29 \pm 5 ^c
300	34 \pm 7 ^c	ND	10 \pm 2 ^d
400	16 \pm 1 ^c	ND	ND
500	ND	ND	ND

[†] ND 表示未检出;同列小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

由表 2 可知,随着压力的升高,pH 无显著变化;茶汤的颜色随压力升高发生了可测量但幅度较小的变化($\Delta E<2.0$,属于“轻微可察觉”范围)。这种劣变可能与高压诱导的某些色素分子结构微小变化或茶多酚的轻微氧化有关。茶多酚分子中的酚羟基可作为氢供体或电子供体,清除自由基并终止氧化反应的链式传递,从而有效延缓茶汤的氧化性色泽劣变^[13-14];此外,Hu 等^[13]研究证实,超高压处理对叶绿素等色素分子的共价键无破坏作用。经过超高压后黄金茶饮料中的可溶性糖与对照组相比均显著增加,是因为超高压处理改变了茶多糖复合物(TPC)的二级结构,导致大分子多糖降解,释放出了可检测的游离单糖或寡糖;同时超高压处理也增强了茶多糖与茶多酚的相互作用,导致部分茶多酚被结合或沉淀,降低了其

表2 超高压压力对黄金茶饮料理化指标的影响[†]

Table 2 Effect of HPP on physicochemical properties of golden tea beverage

压力/MPa	pH	ΔE	茶多酚/(mg·kg ⁻¹)	可溶性总糖/(mg·kg ⁻¹)	游离氨基酸/(mg·kg ⁻¹)
0.1	6.23±0.00 ^{ab}	—	365.71±0.44 ^a	286.77±4.40 ^d	149.44±0.43 ^a
100	6.22±0.02 ^b	1.64±0.00 ^c	365.56±0.24 ^{ab}	349.35±5.25 ^e	148.75±0.33 ^b
200	6.26±0.02 ^a	1.66±0.02 ^c	364.83±0.30 ^b	362.31±2.41 ^b	148.68±0.13 ^{bc}
300	6.24±0.02 ^{ab}	1.68±0.01 ^b	362.45±0.40 ^c	388.67±8.68 ^a	148.58±0.27 ^{bc}
400	6.23±0.02 ^{ab}	1.69±0.02 ^{ab}	360.15±0.33 ^d	393.57±0.92 ^a	148.29±0.10 ^{bc}
500	6.24±0.02 ^{ab}	1.71±0.00 ^a	358.16±0.60 ^e	342.04±7.92 ^e	148.20±0.03 ^c

[†] 同列小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

在茶汤中的可检测含量^[15],所以茶多酚逐渐减少。随着超高压压力的升高,游离氨基酸总量呈显著下降的趋势。侯思涵^[16]对哈密瓜汁进行超高压处理时也发现,提高处理压力会使哈密瓜汁中的氨基酸含量降低。

超高压压力对茶汤品质影响的主效应雷达图如图1(a)所示。

2.1.2 超高压时间对微生物指标和理化指标的影响 由表3可知,随着超高压时间的延长,黄金茶饮料中的菌落总数、霉菌及酵母菌数量均呈指数降低的趋势。超高压时间为5 min时,菌落总数下降超过95%,表明高压已快速破坏细胞膜结构,使细胞代谢迅速停滞,从而使菌落总数下降^[3]。超高压时间为10 min时,酵母和霉菌数量降至10 CFU/mL,可能是二者细胞结构简单且细胞壁较薄,对压力较为敏感。超高压时间为25 min时,霉菌与酵母菌已完全未被检出,菌落总数亦降至极低水平,可能是部分革兰氏阳性菌(如芽孢杆菌属)因具有较厚的肽聚糖细胞壁,表现出较高的压力耐受性^[17]。以上结果表明,在固定超高压压力下,延长处理时间可显著增强杀菌效果。

由表4可知,随着超高压时间的延长,黄金茶饮料的pH、色差,与杀菌前的黄金茶饮料相比差异不大;茶多酚整体呈下降趋势,可能与高压诱导的氧化降解有关。Shkolnikov等^[18]基于pH恒定的高压试验,利用Eyring方程计算并确定了反应具有负活化体积,证实压力升高会加速茶多酚的降解反应速度。随着超高压时间的延长,

表3 超高压时间对黄金茶饮料微生物指标的影响[†]

Table 3 Effect of HPP time on microbiological indicators

时间/min	菌落总数/(CFU·mL ⁻¹)	大肠菌群/(MPN·mL ⁻¹)	霉菌和酵母菌/(CFU·mL ⁻¹)
0	1 770±270 ^a	ND	521±19 ^a
5	75±3 ^b	ND	26±2 ^b
10	34±7 ^b	ND	10±2 ^c
15	15±4 ^b	ND	4±2 ^c
20	11±1 ^b	ND	3±1 ^c
25	3±2 ^b	ND	ND

[†] ND表示未检出;同列小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

可溶性总糖含量呈先上升后下降的变化趋势,超高压时间为10 min时可溶性总糖含量最高,可能是高压的介入迅速破坏了维持茶多糖复合物二三级结构的氢键和疏水相互作用,使大分子多糖链解聚^[15],因此前期可溶性总糖含量呈上升趋势;随着超高压时间继续延长,可溶性总糖作为美拉德反应的底物逐渐被消耗,因此可溶性总糖含量下降。游离氨基酸含量随着超高压时间的延长略微下降,这是因为高压可能促进氨基酸的蛋白水解转化或其他化学反应,导致部分氨基酸(如苏氨酸、丝氨酸)含量降低^[19]。综上,在300 MPa下,延长超高压处理时间可进一步提升黄金茶饮料的微生物安全水平,且对各理化品质参数无显著负面影响。

表4 超高压时间对黄金茶饮料理化指标的影响[†]

Table 4 Effect of HPP time on physicochemical properties of golden tea beverage

时间/min	pH	ΔE	茶多酚/(mg·kg ⁻¹)	可溶性总糖/(mg·kg ⁻¹)	游离氨基酸/(mg·kg ⁻¹)
0	6.23±0.01 ^c	—	365.71±0.44 ^b	286.77±4.40 ^d	149.44±0.43 ^a
5	6.22±0.02 ^c	1.64±0.01 ^d	368.01±0.70 ^a	384.01±5.66 ^a	148.97±0.12 ^b
10	6.24±0.02 ^{bc}	1.68±0.01 ^{bc}	362.45±0.40 ^c	388.67±8.68 ^a	148.58±0.27 ^{bc}
15	6.24±0.02 ^c	1.70±0.01 ^a	360.69±0.50 ^d	371.60±0.16 ^b	148.38±0.20 ^{cd}
20	6.27±0.02 ^{ab}	1.69±0.02 ^{ab}	359.31±0.50 ^e	314.90±0.74 ^e	148.21±0.08 ^{cd}
25	6.28±0.03 ^a	1.67±0.01 ^c	357.55±0.63 ^f	273.13±0.26 ^e	148.00±0.11 ^d

[†] 同列小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

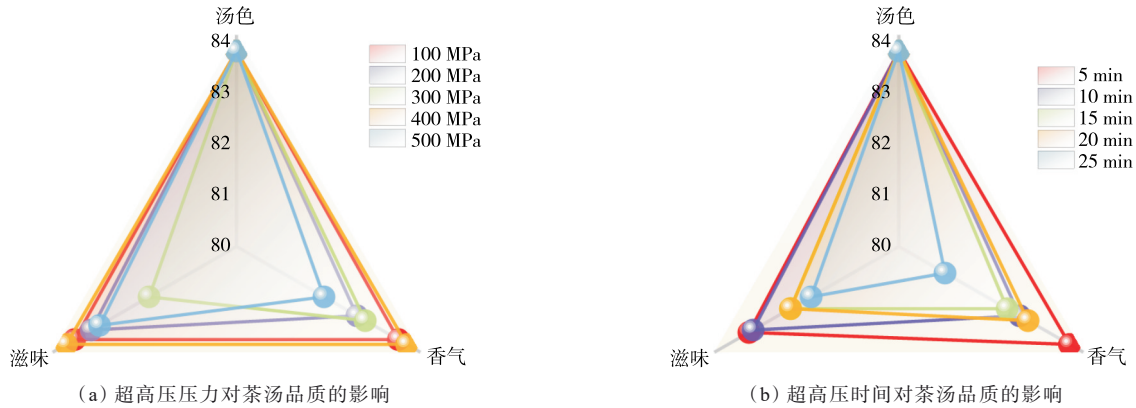


图 1 茶汤品质主效应雷达图

Figure 1 Main effect radar chart of tea infusion quality

超高压时间对茶汤品质影响主效应雷达图如图 1(b) 所示。

2.1.3 超高压杀菌工艺确定

(1) 菌落残存曲线: 如图 2 所示, 随超高压处理时间延长黄金茶饮料中残存菌落总数持续减少, 而且超高压压力越大, 下降趋势越明显。动力学拟合结果(表 5)表明, 一级动力学模型(Log-linear 模型)的相关系数 R^2 为 0.77~0.98, 仅在较高压力时(如 400~500 MPa)拟合较好。相比之下, Weibull 模型的 R^2 为 0.95~0.98, 显示出更广泛的适应性与更高的拟合精度, 该模型的拟合结果也证实失活曲线存在明显的“拖尾”现象。基于 Weibull 模型的拟合方程, 计算了达到 GB 7101—2015《食品安全国家标准 饮料》($\lg N \leq 2$)所需的最短杀菌时间。结果表明, 在不同压力条件下, 达到该标准所需的最短时间分别为: 100 MPa 时至少 26 min, 200 MPa 时至少 12 min, 300 MPa 时至少 5 min, 400 MPa 时至少 2 min, 500 MPa 时至少 1 min。结合图 3 各杀菌条件下黄金茶饮料的最高感官评分, 得到符合卫生标准且感官良好的压力—时间组合共

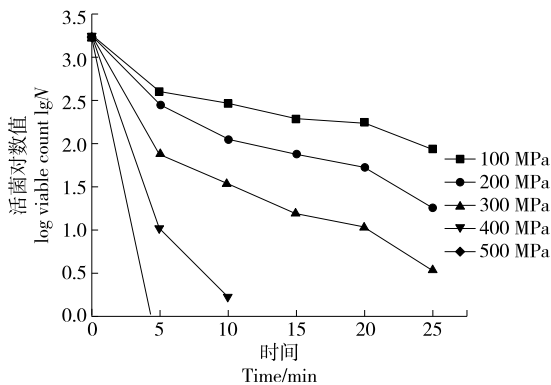


图 2 菌落总数—压力致死速率曲线

Figure 2 Curve of total viable count versus pressure level-lethality rate

5 组, 如表 6 所示。

(2) 最佳超高压杀菌参数确定: 按表 6 设计的试验条件对黄金茶饮料进行超高压杀菌, 其杀菌效果如表 7~表 9 所示。由表 7 可知, 所有处理组的菌落总数、大肠菌群、霉菌和酵母菌数量均显著降低, 其中处理组 3、4、5 均未检出大肠菌群、霉菌和酵母菌且菌落总数低于 100 CFU, 完全符合 GB 7101—2022《食品安全国家标准 饮料》中关于

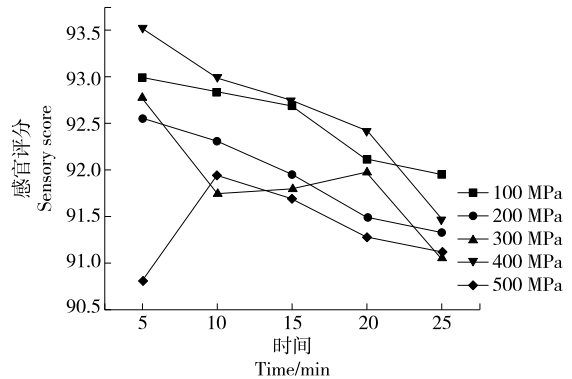


图 3 各压力时间下黄金茶饮料感官评分曲线

Figure 3 Sensory score curve of golden tea beverage under various pressure-time conditions

表 5 微生物杀菌动力学拟合情况

Table 5 Model fitting of microbial inactivation kinetics

压力/ MPa	Log-linear 模型		Weibull 模型	
	$\lg N = \lg N_0 - kt$	R^2	$\lg N_t = \lg N_0 - (t/a)^\beta$	R^2
100	$\lg N = 3.02 - 0.045t$	0.85	$\lg N = 3.24 - (t/16.05)^{0.45}$	0.96
200	$\lg N = 2.98 - 0.071t$	0.90	$\lg N = 3.24 - (t/7.79)^{0.55}$	0.97
300	$\lg N = 2.74 - 0.094t$	0.84	$\lg N = 3.24 - (t/2.74)^{0.43}$	0.98
400	$\lg N = 2.55 - 0.1037t$	0.77	$\lg N = 3.24 - (t/1.05)^{0.34}$	0.96
500	$\lg N = 3.05 - 0.6248t$	0.98	$\lg N = 3.03 - (t/0.04)^{0.24}$	0.95

表6 超高压杀菌工艺试验设计

处理组	压力/MPa	保压时间/min
1	100	26
2	200	12
3	300	5
4	400	5
5	500	10

商业无菌的要求。由表8可知,各处理组间pH与游离氨基酸含量变化不明显;与未杀菌组相比,处理组3、4的茶多酚和可溶性总糖含量略有升高,而处理组5的茶多酚含量显著降低。

各处理组之间色泽整体变化幅度较小,仅处理组5的 ΔE 值略高。感官评价结果(表9)显示,不同处理条件对香气影响较为明显,可能是因为高压能够增强或延缓酶促反应与化学反应,使整体香气轮廓改变^[20]。其中除未

表7 超高压试验条件的杀菌效果[†]

处理组	菌落总数/ (CFU·mL ⁻¹)	大肠菌群/ (MPN·mL ⁻¹)	霉菌和酵母菌/ (CFU·mL ⁻¹)
未杀菌	914±21	12±2	215±7
1	146±8	7±2	20±2
2	70±10	4±2	6±1
3	29±3	ND	ND
4	8±2	ND	ND
5	ND	ND	ND

† ND表示未检出;同列小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

杀菌组之外,处理组4(400 MPa、5 min)的综合感官评分最高,尤其在香气与滋味方面与未杀菌组无显著差异,表明该条件在达到杀菌要求的同时能最大程度地保留产品原有风味与口感。因此,结合微生物指标、理化指标及感官品质3项指标,确定黄金茶饮料超高压杀菌的最佳工艺条件为:压力400 MPa,时间5 min。

表8 超高压试验条件下黄金茶饮料的理化指标[†]

处理组	pH	茶多酚/(mg·kg ⁻¹)	可溶性总糖/(mg·kg ⁻¹)	游离氨基酸/(mg·kg ⁻¹)
未杀菌	6.23±0.01 ^{ab}	365.71±0.44 ^b	286.77±4.40 ^c	149.44±0.43 ^{ab}
1	6.22±0.02 ^a	363.75±0.52 ^c	315.10±1.18 ^d	150.20±1.57 ^a
2	6.26±0.02 ^{ab}	364.64±0.07 ^c	369.18±0.67 ^b	148.64±0.07 ^b
3	6.22±0.02 ^{ab}	368.01±0.70 ^a	384.01±5.66 ^a	148.97±0.12 ^{ab}
4	6.22±0.02 ^b	366.02±0.24 ^b	386.73±0.54 ^a	148.41±0.09 ^b
5	6.24±0.02 ^{ab}	358.16±0.60 ^d	342.04±7.92 ^c	148.20±0.03 ^b

† 同列小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

表9 超高压试验条件的色差变化及品质得分[†]

处理组	ΔE	色泽(得分)	香气(得分)	滋味(得分)	感官评分(总分)
未杀菌	—	94.07±0.12 ^a	93.58±0.71 ^{bc}	94.18±0.20 ^a	93.95±0.28 ^a
1	1.65±0.01 ^c	93.00±0.00 ^b	92.60±0.53 ^{cd}	93.38±0.40 ^b	93.03±0.04 ^c
2	1.66±0.02 ^b	93.17±0.29 ^b	92.07±0.31 ^{de}	92.46±0.19 ^c	92.46±0.08 ^d
3	1.64±0.01 ^c	93.13±0.23 ^b	91.37±0.47 ^e	92.72±0.37 ^c	92.33±0.04 ^d
4	1.64±0.01 ^c	93.27±0.25 ^b	93.67±0.21 ^a	93.79±0.07 ^{ab}	93.64±0.14 ^b
5	1.71±0.00 ^a	93.13±0.23 ^b	91.05±0.71 ^e	93.47±0.12 ^b	92.55±0.20 ^d

† 同列小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

2.2 杀菌前后黄金茶饮料香气成分分析

绿茶的香气特征源于其复杂的挥发性化合物组合,这些化合物的种类及其相对含量共同决定了绿茶的感官属性与整体品质,从而衍生出诸如花香、果香与清香等多样化的风味轮廓。有研究^[1,21]发现,黄金绿茶的主要香气

成分以醇类、醛类和酯类为主。其中,芳樟醇、香叶醇、壬醛、 β -紫罗兰酮、顺茉莉酮、(E)-2-辛烯醛、水杨酸甲酯等是关键贡献物质,共同构成了黄金绿茶“嫩栗香、清香、花香”协调的典型香气风格。

黄金茶饮料杀菌前后的总离子色谱图如图4、图5所

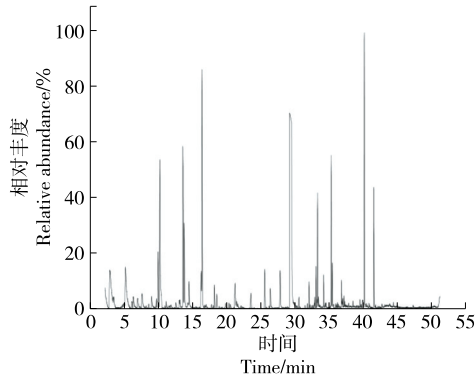


图 4 黄金茶饮料杀菌前的香气成分总离子流色谱图

Figure 4 TIC of aroma components in golden tea beverage before sterilization

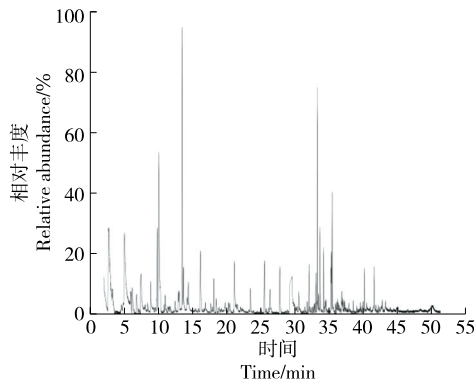


图 5 黄金茶饮料杀菌后的香气成分总离子流色谱图

Figure 5 TIC of aroma components in golden tea beverage after sterilization

示, 杀菌前后黄金茶饮料的挥发性化合物存在一定变化。各挥发性化合物及定量数据如表 10 所示, 结果表明, 杀菌前总挥发性成分质量浓度为 3.53 $\mu\text{g/L}$, 杀菌后总挥发性成分质量浓度为 1.20 $\mu\text{g/L}$, 表明超高压杀菌对挥发性物质总体具有削减作用。

在杀菌前的黄金茶饮料中, 酯类、醇类、醛类、酚类、烷烃类、烯烃类、杂环类和其他类挥发性成分占总挥发性成分的百分比分别为 55.47%, 18.88%, 10.83%, 9.93%, 0.07%, 1.05%, 0.55%, 3.84%。在杀菌后的黄金茶饮料中, 酯类、醇类、烯烃类、酚类、烷烃类、醛类、酮类和杂环类挥发性成分占总挥发性成分的百分比分别为 72.60%, 21.06%, 6.89%, 4.84%, 3.40%, 0.74%, 0.19%, 3.77%。在香气组成上, 杀菌前的样品以酯类、醇类、醛类及酚类为主要贡献类别, 三者占总挥发性成分的 95% 以上。杀菌后, 香气轮廓重构, 酯类与醇类的占比增大, 共同构成主体框架; 与此同时, 烯烃类物质占比上升, 而醛类和酚类下降。

醇类中, 呈花香和果香的香气物质占主导, 其杀菌前

的质量浓度较杀菌后的高, 芳樟醇(甜嫩花香)质量浓度从 0.525 $\mu\text{g/L}$ 降至 0.182 $\mu\text{g/L}$, 下降了 65.3%, 橙花醇(依兰、柑橘香)质量浓度从 0.141 $\mu\text{g/L}$ 骤降至 0.002 $\mu\text{g/L}$, 下降了 98.6%。醛类主要含有呈清香和果香的香气物质, 壬醛(柑橘、黄瓜清香)质量浓度从 0.298 $\mu\text{g/L}$ 降至 0.041 $\mu\text{g/L}$, 下降了 86.2%, 癸醛(甜橙、花香)杀菌后未检出。芳樟醇与壬醛等物质呈花香且阈值较低, 对茶汤典型风味具有关键贡献, 其显著降低导致了黄金茶饮料的花香及清香香气减弱。

与传统热杀菌相比, 超高压处理并未引发典型热致异味化合物的生成。汪洁琼^[22]研究表明, 绿茶饮料在热处理过程中易产生“熟闷气味”, 该不良风味主要源于脂质氧化(生成壬醛等)、类胡萝卜素热降解(生成茶螺烷等)以及香气糖苷前体的过度水解与转化(释放苯乙醛、香叶醇等)等一系列热驱动化学反应, 这些反应在高温下被激活, 导致特定异味物质过量, 从而构成“熟闷”的感官特征。经超高压处理后并未检测到壬醛、茶螺烷等关键热致异味物质的异常积累, 也未检出 2-甲氧基-4-乙烯基苯酚(烟熏味)、甲硫氨酸(煮土豆味)及其他常见硫化物等典型热致异味物质^[23]。相反, 杀菌后出现了 β -月桂烯(甜香)、去氢白菖烯(草本香)以及 *N*-羟苯基甲亚胺酸甲酯(蜡质酯香)等物质, 这些成分共同构建了杀菌后的黄金茶饮料熟甜、略带脂感的滋味背景, 体现为香气轮廓的再构成而非劣变。

黄金茶饮料的整体香气特征经超高压杀菌后由“清新花香型”向“熟甜型”转变。与高温杀菌相比, 超高压处理虽引起了香气轮廓与细腻度的可辨识改变, 但并未造成香气结构的颠覆性破坏, 尤其避免了异味化合物的形成杀菌, 是一种相对温和且能较好保持茶饮料本真风味的加工手段。

3 结论

研究系统探讨了超高压杀菌对黄金茶饮料的杀菌效果及关键品质的影响, 通过一级动力学模型与 Weibull 模型的拟合, 揭示了超高压杀菌的动力学规律, 并确定了最佳工艺参数。比较发现, Weibull 模型(相关系数为 0.95~0.98)比一级动力学模型具有更高的拟合精度, 能更准确地描述微生物在高压下的非对数线性失活过程。在 400 MPa、5 min 的处理条件下, 黄金茶饮料的微生物指标完全符合 GB 7101—2015《食品安全国家标准 饮料》, 同时其感官品质得分最高, 能最大程度地保留产品的原始风味。

超高压杀菌对茶饮料色泽、pH 及游离氨基酸总量的影响较小。气相色谱-质谱分析表明, 超高压杀菌虽使部分花果香物质(如芳樟醇、壬醛)的含量下降, 但同时使

表 10 黄金茶饮料香气组分 GC-MS 定量结果[†]

Table 10 Quantitative results of aroma components in golden tea beverage by GC-MS

化合物 种类	化合物名称	CAS 编号	气味描述 ^[24]	质量浓度/($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	
				杀菌前	杀菌后
醇类	芳樟醇	78-70-6	甜嫩新鲜的花香	0.525	0.162
	橙花醇	106-25-2	依兰、柑橘	0.141	0.002
	2-乙基己醇	104-76-7	玫瑰、草木香	—	0.005
	香叶醇	106-24-1	花香、玫瑰、果香	—	0.085
	二甲基硅烷二醇	1066-42-8	柑橘、花香、油脂	0.142	—
烯烃类	α -古巴烯	1000360-33-0	木香、辛香、烟熏感	0.011	—
	β -杜松烯	523-47-7	百里香、草本木香	0.026	0.007
	β -月桂烯	123-35-3	嫩香甜香	—	0.047
	去氢白菖烯	483-77-2	草本香料	—	0.016
烷烃类	正十五烷	629-62-9	蜡味	0.025	0.033
	正十七烷	629-78-7	栗香甜香	—	0.008
	壬醛	124-19-6	醛香、柑橘、黄瓜	0.298	0.041
醛类	癸醛	112-31-2	甜醛香、橙皮香、花香	0.072	—
	2,4-二叔丁基苯酚	96-76-4	栗香、甜香	0.240	0.043
酚类	对特辛基苯酚	140-66-9	酚样气味	0.095	0.008
	2,4-二叔戊基苯酚	120-95-6	酚样气味	0.016	0.007
酯类	正己酸乙酯	123-66-0	果香、菠萝、酒香	0.634	—
	辛酸乙酯	106-32-1	蜡质、果香、酒香	0.087	0.123
	壬酸乙酯	123-29-5	果香、玫瑰香、蜡香	0.070	0.118
	癸酸甲酯	110-42-9	油性、葡萄酒、果香花香	—	0.005
	十一酸乙酯	627-90-7	蜡质、奶油、轻微果香	—	0.026
	月桂酸乙酯	106-33-2	花香,带有奶油、乳脂	—	0.125
	邻苯二甲酸二丁酯	84-74-2	果香花香	0.266	—
	邻苯二甲酸二异丁酯	84-69-5	花香	0.506	—
	邻苯二甲酸二异辛酯	131-20-4	微弱气味	—	0.129
	N-羟基苯甲亚胺酸甲酯	100022-86-6	蜡质	0.045	0.181
	3,5-二叔丁基-4-羟基苯甲酯	1620-98-0	微弱气味	0.013	—
	1,2-苯二甲酸丁基异丁基酯	17851-53-5	微弱气味	—	0.008
	邻苯二甲酸异丁基十一烷基酯	1000308-97-3	微弱气味	—	0.010
	2-甲基丙酮-3-羟基-2,4,4-二甲基戊基酯	74367-34-3	—	0.198	—
	酮类	橙化氢丙酮	3879-26-3	脂肪、金属味	—
杂环类	咖啡因	58-08-2	无气味	0.019	0.045
其他	N-(4-叔戊基苯基)乙酰胺	1000373-45-3	—	0.073	—
	邻二甲苯	95-47-6	玫瑰	0.018	—

[†] “—”表示未检出。

促进了 β -月桂烯等熟甜香物质的生成,使黄金茶饮料整体香气轮廓由“清新花香型”向“熟甜型”转变。与传统热杀菌相比,超高压杀菌能有效抑制茶螺烷等典型热致异味化合物的生成,显著降低热劣变反应引起的风味失真,更好地保持了茶饮料香气的主体香韵与整体协调性。

综上,超高压杀菌是一种适用于黄金茶饮料的有效且相对温和的杀菌技术,其最佳工艺为400 MPa处理5 min。未来可进一步优化处理参数(如梯度加压、协同低

温)以在保障安全性的同时,更精准地调控和保留其典型风格。

参考文献

- [1] ZHONG N, ZHAO X, YU P H, et al. Characterization of the sensory properties and quality components of Huangjin green tea based on molecular sensory-omics[J]. Foods, 2023, 12(17): 3 234.
- [2] 欧阳建, 黄纯勇, 李适, 等. 黄金茶绿茶风味轮及滋味分类模

- 型的构建[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(24): 139-146.
- OUYANG J, HUANG C Y, LI S, et al. Construction of flavor wheel and taste classification model for Huangjinchang green tea [J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(24): 139-146.
- [3] SONI A, OEY I, SILCOCK P, et al. Bacillus spores in the food industry: a review on resistance and response to novel inactivation technologies[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2016, 15(6): 1 139-1 148.
- [4] ROOBAB U, AADIL R M, MADNI G M, et al. The impact of nonthermal technologies on the microbiological quality of juices: a review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2018, 17(2): 437-457.
- [5] CHEN D, PAN S X, CHEN J, et al. Comparing the effects of high hydrostatic pressure and ultrahigh temperature on quality and shelf life of cloudy ginger juice[J]. Food and Bioprocess Technology, 2016, 9(10): 1 779-1 793.
- [6] 张园园, 刘振民, 郑远荣. 超高压处理对奶油奶酪质构、风味及货架期的影响[J]. 食品与机械, 2023, 39(8): 110-115, 174.
- ZHANG Y Y, LIU Z M, ZHENG Y R. Effect of ultra - high pressure treatment on the texture, flavor and shelf life of cream cheese[J]. Food & Machinery, 2023, 39(8): 110-115, 174.
- [7] PEI L Y, LI J, XU Z L, et al. Effect of high hydrostatic pressure on aroma components, amino acids, and fatty acids of Hamimelon (*Cucumis melo* L. var. *reticulatus* naud.) juice[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(3): 1 394-1 405.
- [8] 邓建, 唐政, 万睿智, 等. 藤茶制备关键工艺优化及成品风味特征研究[J]. 食品与机械, 2025, 41(8): 155-163.
- DENG J, TANG Z, WAN R Z, et al. Key process optimization of vine tea and flavor characteristics of finished products[J]. Food & Machinery, 2025, 41(8): 155-163.
- [9] 安勤, 鲍肃都, 陈宏宇, 等. 基于GC×GC-QTOF-MS分析不同品种汝城白毛茶白茶的香气特征[J]. 食品科学, 2025, 46(4): 163-171.
- AN Q, BAO S D, CHEN H Y, et al. Analysis of key aroma compounds in three varieties of Rucheng white tea by comprehensive two-dimensional gas chromatography-quadrupole time-of-flight mass spectrometry[J]. Food Science, 2025, 46(4): 163-171.
- [10] GEERAERD A H, VALDRAMIDIS V P, VAN IMPE J F. GInaFit, a freeware tool to assess non-log-linear microbial survivor curves[J]. International Journal of Food Microbiology, 2005, 102(1): 95-105.
- [11] HAYASHI R. High pressure in food processing and preservation: principle, application and development[J]. High Pressure Research, 1991, 7(1/2/3/4/5/6): 15-21.
- [12] MCKAY A M, LINTON M, STIRLING J, et al. A comparative study of changes in the microbiota of apple juice treated by high hydrostatic pressure (HHP) or high pressure homogenisation (HPH) [J]. Food Microbiology, 2011, 28(8): 1 426-1 431.
- [13] HU Y W, SUN H N, MU T H. Effects of different pH, temperature, and pressurisation time on the stability of chlorophylls treated with Zn²⁺ and high hydrostatic pressure[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2023, 58(9): 4 715-4 725.
- [14] CHEN X Q, ZHAO Y L, ZHAO Y, et al. Effect of ultra-high pressure treatment on the characteristics of a tea polysaccharide conjugate aqueous solution[J]. Industrial Crops and Products, 2021, 171: 113859.
- [15] HUANG H W, LUNG H M, YANG B B, et al. Responses of microorganisms to high hydrostatic pressure processing[J]. Food Control, 2014, 40: 250-259.
- [16] 侯思涵. 超高压对哈密瓜汁中关键酶、氨基酸及理化指标影响的研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2018: 22.
- HOU S H. Effects of ultra high pressure on essential enzymes, amino acids and physicochemical index in Hamimelon juice [D]. Shihezi: Shihezi University, 2018: 22.
- [17] MARTÍNEZ-MONTEAGUDO S I, BALASUBRAMANIAM V M. Fundamentals and applications of high-pressure processing technology[M]// BALASUBRAMANIAM V, BARBOSA-CÁNOVAS G, LELIEVELD H. High pressure processing of food. New York: Springer, 2016: 1-17.
- [18] SHKOLNIKOV H, BELOCHVOSTOV V, OKUN Z, et al. The effect of pressure on the kinetics of polyphenolics degradation-implications to hyperbaric storage using Epigallocatechin-gallate as a model[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 59: 102273.
- [19] 焦海珍, 李乐, 田双红, 等. 4个黄金茶品种(系)绿茶和红茶香气品质特征及关键香气成分研究[J]. 茶叶科学, 2025, 45(6): 931-942.
- JIAO H Z, LI L, TIAN S H, et al. Aroma quality characteristics and key aroma components analysis of green and black tea from four 'Huangjinchang'-related cultivars[J]. Journal of Tea Science, 2025, 45(6): 931-942.
- [20] SONG Y C, BI X F, ZHOU M, et al. Effect of combined treatments of ultrasound and high hydrostatic pressure processing on the physicochemical properties, microbial quality and shelf-life of cold brew tea[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 56(11): 5 977-5 988.
- [21] XING L J, ZHANG H, QI R L, et al. Recent advances in the understanding of the health benefits and molecular mechanisms associated with green tea polyphenols[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(4): 1 029-1 043.
- [22] 汪洁琼. 绿茶饮料熟闷气味物质鉴定及形成机制与调控技术研究[D]. 重庆: 西南大学, 2024: 50.
- WANG J Q. Identification of substances, formation mechanism and regulation technology of retort odor of green tea beverages[D]. Chongqing: Southwest University, 2024: 50.
- [23] TAO M, GUO W L, LIANG J, et al. Unraveling the key cooked off-flavor compounds in thermally sterilized green tea beverages, and masking effect of tea raw material baking[J]. Food Chemistry, 2025, 464: 141671.
- [24] 王聪明. 基于风味组学的四川典型绿茶和红茶香型关键组分筛选及呈香特征评价[D]. 成都: 四川农业大学, 2024: 100-101.
- WANG C M. Selection of key aroma components and evaluation of aroma characteristics of typical green and black teas in Sichuan based on flavor omics[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2024: 100-101.