

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241216002

引用格式: 黄定强, 游伟良, 戈子龙, 等. 植物饮料中耐热芽孢超高温杀菌效果分析及模型构建[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(12): 253–262.

HUANG DQ, YOU WL, GE ZL, *et al.* Analysis of ultra-high temperature sterilization effect on thermotolerant spores in plant-based drink and model construction [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(12): 253–262. (in Chinese with English abstract).

植物饮料中耐热芽孢超高温杀菌效果分析及模型构建

黄定强¹, 游伟良¹, 戈子龙², 刘光², 刘军², 王章英³, 贺清辉^{1*}, 曾嘉锐^{2*}

[1. 安利(中国)研发中心有限公司, 广州 510730; 2. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 广州 510640;
3. 广东省农业科学院作物研究所, 广州 510640]

摘要: **目的** 探究超高温(ultra-high temperature, UHT)杀菌对植物饮料中耐热芽孢的最适杀菌效果, 构建 UHT 适度杀菌模型。**方法** 对 6 种功能性植物饮料(functional plant-based drink, FPD)的理化特性进行对比分析, 确定主要变化理化指标和特征饮料研究对象, 探究 pH、黏度、固形物含量对饮料中嗜热芽孢 UHT 杀菌效果的影响, 构建回归模型。**结果** pH 和黏度对饮料的 UHT 杀菌 F 值影响更加显著($P<0.05$), 而固形物含量的影响较小。pH 和黏度的 F_0 值线性拟合系数分别为 208.927 ($P<0.05$)和 23.767 ($P<0.01$), 非线性拟合系数分别为 171.067 ($P<0.05$)和 0.543(二次方变量值, $P<0.05$), 表明随着 pH 和黏度值的增加, 杀菌效果呈减弱趋势。当温度提高至 130 °C 后, 两者的系数显著程度减弱, 而固形物含量的系数显著程度增强, P 降低至约 0.03。模型的预测值和实际 F_0 值之间呈现总体接近的趋势, 拟合趋势 R^2 分别为 0.868(线性)和 0.869(非线性), 表明模型具有较高的预测性能。**结论** 建立的 UHT 杀菌模型可以根据饮料的理化特性精准拟合杀菌参数并预测杀菌效果。该研究对于指导 FPD 的 UHT 杀菌工艺设计, 提升产品的营养和风味品质都具有重要作用。

关键词: 超高温杀菌; 功能性植物饮料; 耐热芽孢; 回归模型

Analysis of ultra-high temperature sterilization effect on thermotolerant spores in plant-based drink and model construction

HUANG Ding-Qiang¹, YOU Wei-Liang¹, GE Zi-Long², LIU Guang², LIU Jun²,
WANG Zhang-Ying³, HE Qing-Hui^{1*}, ZENG Jia-Rui^{2*}

[1. Amway (China) R&D Co., Ltd., Guangzhou 510730, China; 2. Sericultural & Agri-Food Research Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China; 3. Crops Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China]

收稿日期: 2024-12-16

基金项目: 广东省农业科学院食品营养与健康研究中心建设运行经费项目(XTXM 202205)

第一作者: 黄定强(1974—), 男, 工程师, 主要研究方向为保健食品及功能食品开发。E-mail: david.huang@amway.com

*通信作者: 贺清辉(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为保健食品及功能食品开发。E-mail: fred.he@amway.com

曾嘉锐(1991—), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为食品微生物和发酵工程。E-mail: zengjiarui@hotmail.com

ABSTRACT: Objective To investigate the optimal sterilization effects of ultra-high temperature (UHT) sterilization processes on thermophilic spores in plant-based drinks, and construct a UHT moderate sterilization model. **Methods** The physicochemical properties of 6 types of functional plant-based drinks (FPD) were compared, to determine the main changes in physicochemical indicators and the objects of characteristic drinks. The effects of pH, viscosity and solid content on the UHT sterilization effect against thermophilic spores were investigated, and a regression model was constructed. **Results** The pH and viscosity significantly influenced the UHT sterilization F -value ($P<0.05$), while the effect of solid content was found to be relatively minor. The linear fitting coefficients of pH and viscosity for the F_0 values were determined to be 208.927 ($P<0.05$) and 23.767 ($P<0.01$), respectively, while the nonlinear fitting coefficients were found to be 171.067 ($P<0.05$) and 0.543 (square variable value, $P<0.05$). These results indicate that the sterilization effectiveness weakened as the values of pH and viscosity increased. When the temperature reached 130 °C, the significance of both parameters diminished, whereas the significance of the solid content coefficient was observed to increase, with the P decreasing to approximately 0.03. The predicted values of the models and the actual F_0 values showed a generally close correlation, with fitting trends resulting in R^2 values of 0.868 (linear) and 0.869 (nonlinear), indicating that the model possesses a high level of predictive performance. **Conclusion** The constructed UHT model can accurately fit the sterilization parameters and predict the effect according to the physicochemical properties of the plant-based drinks. This study provides essential guidance for the design of the UHT sterilization process for FPD, ultimately enhancing the nutritional and flavor quality of the drink products.

KEY WORDS: ultra-high temperature sterilization; functional plant-based drink; thermophilic spores; regression model

0 引言

全球功能性饮料市场规模已经超过 1000 亿美元,其中功能性植物饮料(functional plant-based drink, FPD)已成为重要的组成部分,其市场规模不断扩大^[1]。随着人们健康饮食意识的日益增强,消费者对 FPD 的安全性、营养品质以及健康功效的需求在不断提高,促进产品加工工艺及技术的更高效化发展。

目前,饮料的灭菌方式主要依靠传统的高温巴氏杀菌,具有高效便捷的优点。然而,巴氏杀菌工艺所需的时间通常较长,易造成饮料中的部分营养物质、风味组分等产生热化学反应变质,降低饮料的综合品质^[2]。使用非热加工技术如超高压^[3]、超声波^[4]、紫外线照射^[5]等,能够提高食品的营养和风味品质,但是目前还存在设备成本偏高、杀菌稳定性不如热处理等问题^[2],限制了其在饮料生产工业中的广泛应用。

耐热微生物如芽孢、孢子以及部分霉菌等^[6],通常具有由肽聚糖组成的致密厚壁生物体结构,从而具备较强的耐高温、耐辐射、耐高压特性,难以通过巴氏灭菌方法有效灭活,在规模化的食品生产过程中容易引发污染变质问题,造成严重的浪费和安全威胁,日益引起生产领域的关注和重视^[7]。

超高温(ultra-high temperature, UHT)杀菌工艺已被证实可以实现饮料的货架期品质稳定性保障^[8]。UHT 杀菌通过将食品加热到较高温度(通常为 130~150 °C)后处理数秒,可以有效地杀灭绝大部分细菌,实现 FPD 有效杀菌的目的。然而,由于加热温度较高,即便处理时间相对较短,也会对食品营养和风味产生一定影响^[9]。同时,在对耐热微生物的灭菌过程中,难以精确把握温度与相应时间要求,易造成过度杀菌现象,导致营养物质的损失和风味劣变。因此,探究原料污染程度与 UHT 杀菌效果之间的关系,建立基于 UHT 杀菌的 FPD 保质和精准杀菌技术,最大程度地保障营养和风味,对于提升现有产品品质具有重要意义。

本研究通过对不同 FPD 的理化特性进行分析评价,筛选出易受微生物污染的产品及其对应的主要特征理化指标,在调整 pH、黏度、固形物含量的基础上,以嗜热脂肪芽孢杆菌的耐热芽孢残存活力为主要检测指标,探究 UHT 杀菌对 FPD 中耐热芽孢的灭菌效果,探明针对 FPD 的最优 UHT 杀菌参数,建立杀菌效果与原料污染程度、物料理化特性、杀菌工艺参数之间的数学回归模型,并对模型的预测性能进行拟合评价。研究结果对于优化 FPD 的 UHT 杀菌工艺,保障 FPD 的品质,确保食品安全具有重要的理论指导意义。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

1.1.1 菌株

耐热芽孢:嗜热脂肪芽孢杆菌 ATCC 7953(芽孢形态)[北京四环卫生药械厂有限公司]。

1.1.2 原料和试剂

功能性植物饮料:选取 6 种经过 UHT 灭菌工艺处理的市售(同生产批次)不同功能性植物饮料(安利纽崔莱汉本萃系列:活妍、清润、葆明、葆蔚、葆原、安妍,安利(中国)日用品有限公司;清润理化特性调整饮料:以市售的清润饮料为原液,通过添加 HCl 和 NaOH 调节饮料 pH,添加抗性糊精和果粉调节饮料黏度,添加抗性糊精调节饮料固形物含量,所用原料由安利(中国)研发中心有限公司提供;LB 琼脂培养基(分析纯,广东环凯微生物科技有限公司);HCl、NaOH(分析纯,国药集团化学试剂有限公司);葡萄糖、抗性糊精(食品级,河南高宝实业有限公司)。

1.2 仪器与设备

ATAGO PAL-22S 数显折光仪(广州爱拓电子有限公司);Mettler Toledo pH 计[梅特勒托利多科技(中国)有限公司];BROOKFIELD DV-C 数显黏度计[美国博勒飞 Brookfield(中国)有限公司];Loser OM819C 渗透压仪[德国罗泽(LOSER)公司];FBS-3A 智能水分活性测试仪(厦门弗布斯检测设备有限公司);TW-PT-60DT 蒸汽注入式超高温杀菌机(上海沃迪智能装备股份有限公司);LS-75HD 立式压力蒸汽灭菌锅(江阴滨江医疗设备有限公司);ICTHI-250 恒温恒湿箱[施都凯仪器设备(上海)有限公司];SQP 电子天平[精度 1 mg,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司]。

1.3 方法

1.3.1 可溶性固形物含量检测

使用数显折光仪测定饮料的可溶性固形物含量(%),具体方法为取样品 1.0 mL,滴加在折光仪上,随后记录读数。

1.3.2 pH 检测

使用 pH 计对饮料进行 pH 测定,具体方法为取样品 10.0 g 置于玻璃杯中,用校准过的 pH 计进行检测,记录读数。

1.3.3 黏度检测

使用数显黏度计对饮料进行黏度测定,具体方法为取 20.0 g 饮料于离心管中,使用数显黏度计进行检测,选择 62 号转子探头,转速为 100 r/min。

1.3.4 渗透压检测

使用渗透压仪对饮料进行渗透压测定,具体方法为取 1.0 mL 饮料,加入 1.0 mL 超纯水稀释,混匀后取 100 μ L 于 1.5 mL 离心管中,置于渗透压仪进行检测,记录读数。

1.3.5 水分活度检测

使用水分活性测试仪对饮料进行水分活度测定,具体方法为取样品 15.0 g,置于塑料平皿中,然后放入水分活性测量仪中进行检测,记录数值。

1.3.6 微生物定量接种

使用嗜热脂肪芽孢杆菌 ATCC 7953 芽孢菌片(芽孢含量约为 10^6 /片)作为菌种添加剂,添加至 FPD 原液样品中充分搅拌,使其总微生物接种终浓度约为 10^4 CFU/mL。

1.3.7 UHT 杀菌模型构建数据采集

使用蒸汽注入式超高温杀菌机的管式杀菌模式进行 FPD 原液样品的 UHT 灭菌,单次进样量为 10.0 L,流速为 60 L/h,杀菌温度依次选择 120、130 和 140 $^{\circ}$ C,杀菌时间依次为 10、20 和 30 s,灭菌后出样温度为 50 $^{\circ}$ C,在无菌超净台环境中取样测试。

不同 pH、黏度、固形物含量试验:在接种定量芽孢浓度(约 10^4 CFU/mL)的条件下,依据 FPD 的理化特性检测数值范围,分别考察不同 pH (3.30、4.10 和 5.00)、黏度 (20.0、40.0 和 60.0 mPa $\cdot$ s)、固形物含量(35.0%、40.0%和 45.0%)条件下样品 UHT 杀菌后芽孢的残余生长活力。

1.3.8 微生物计数和灭菌参数计算

不同处理后的样品经无菌灌装后保存,并利用 LB 平板培养基涂布计数法和倾注平板计数法检测活体菌落数量^[10],确定微生物残存量,根据特定温度下不同处理时间与残存微生物的对应关系绘制曲线,根据曲线计算特定温度下的 D_T 值、 Z 值和 F_T 值,并以此计算得到 F_0 值^[11-12]。

D_T :在特定的热处理温度下,将残存活微生物数取对数值做纵坐标,相应的热处理时间为横坐标作图,得到一条曲线,曲线斜率的负倒数就是该温度下的 D_T 值。

Z :以 D_T 值的对数值为纵坐标,处理温度为横坐标作图,可以得到一条直线,这条直线的负倒数即为污染微生物在该样品中的 Z 值。

F_T :根据公式(1)计算获得。

$$F_T = D_T \times (\lg N_0 - \lg 10^{-6}) \quad (1)$$

F_0 :根据公式(2)计算获得。

$$F_0/F_T = D_{121}/D_T = 10^{(T-121)/Z} \quad (2)$$

1.3.9 模型构建

根据黏度、pH、固形物含量以及 F 值建立 4 者之间的回归方程,确定杀菌强度与物料特性之间的关系函数,进一步确定合适的 F 值,并通过试验验证模型的准确性^[13-14]。构建杀菌模型的主要步骤如下:

(1)数据准备

根据采集的实验数据,评估不同 pH、黏度、固形物含量等条件下的对应杀菌参数(F 值、 Z 值、 D 值)数据质量,处理缺失值或异常值后整理形成数据表,用于后续分析处理。

(2)特征工程

使用 R 语言(version 4.3.3)对数据进行特征转换、标

准化、归一化等,以提取或生成关于 pH、黏度值、固形物含量与 F 值的相关性特征,评估数据之间的变化关系和趋势。

(3)模型选择

根据数据特征和所考虑的维度复杂性,选择适当的线性和非线性回归模型。

(4)拟合模型

使用 R 4.3.3 (lm、nls、fitnlm 等函数)进行线性、非线性最小二乘模型拟合,获得模型数学计算公式。

(5)模型解释

分析、解释模型系数及其权重和显著性,分析 pH、黏度、固形物含量因素对 UHT 杀菌效果的影响作用。

(6)评估模型

通过拟合度分析,基于给定的 pH、黏度值、固形物含量条件下,预测生成的杀菌 F 值,结合实际检测的数据集,评估模型的预测性能和准确性。

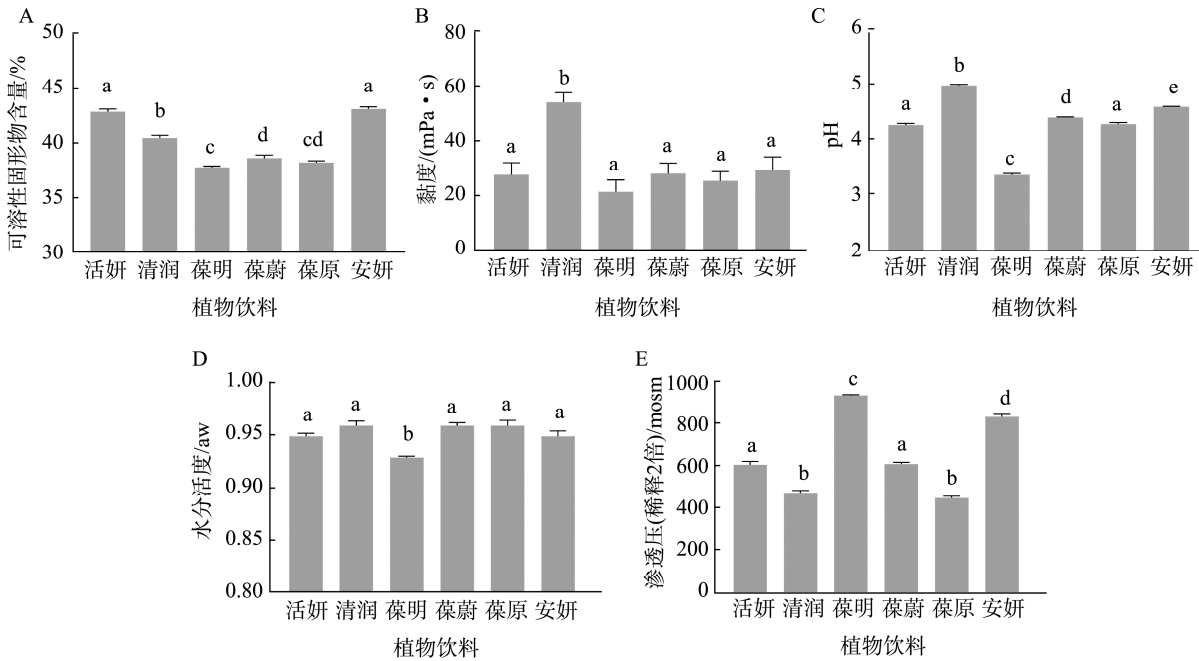
1.4 数据处理

基础实验数据使用 Excel 2010 进行处理, GraphPad Prism 8 软件绘制图表, SPSS 16.0 软件进行方差和显著性分析, R 4.3.3 进行数据集采集、模型构建以及拟合性分析。每个处理做至少 3 次重复试验,结果以平均值 $\pm$ 标准偏差表示。

2 结果与分析

2.1 UHT 灭菌植物饮料理化特性分析

对经过 UHT 灭菌处理的不同植物饮料进行理化特性分析,评估最易受到微生物污染的饮料产品。结果显示,6 种不同饮料中,活妍和安妍饮料中的可溶性固形物含量最高,分别为 43.1%和 43.4%(图 1A),表明活妍和安妍饮料中可能含有较多的糖类、酸类、矿物质等物质^[15]。清润饮料的黏度最高,为 54.7 mPa·s,显著高于其余 5 种饮料 ($P<0.05$)(图 1B),表明其黏性糖类物质更加丰富,增加其质地的浓稠度,对于高温灭菌设备中的热传导也可能产生较大影响^[16]。6 种饮料的 pH 整体偏低(pH 3.30~5.01)(图 1C),有助于抑制微生物的生长^[17]。其中,清润饮料的 pH 最高 (pH 5.01),相比之下可能更易于微生物存活。所有饮料的水分活度值均超过 0.90,表明其易受微生物污染(图 1D)。在渗透压方面,不同饮料的渗透压值差别较大,清润和葆原最低,稀释后检测分别为 485.67 mosm 和 460.33 mosm (图 1E)。现有的研究也表明,植物饮料中含有丰富的天然糖分和其他溶解性物质^[18],因此通常具有较高的渗透压(约 500~4000 mosm),能够提供更多的能量物质。上述结果综合评价可知,6 种植物饮料中,清润饮料的黏度和 pH 都处于最高水平,其理化特性更易于微生物污染和存活,因此选取其作为后续 UHT 杀菌的主要研究对象。



注: 不同字母表示组间具有显著性差异($P<0.05$)。

图 1 UHT 处理 6 种饮料(活妍、清润、葆明、葆蔚、葆原、安妍)的理化特性
可溶性固形物含量(A)、黏度(B)、pH (C)、水分活度(D)以及渗透压值(E)

Fig.1 Soluble solids content (A), viscosity (B), pH (C), water activity (D) and osmotic pressure (E) of 6 kinds of drinks (Huoyan, Qingrun, Baoming, Baowei, Baoyuan, Anyan) treated with UHT

2.2 饮料理化特性对 UHT 杀菌效果的影响

以清润饮品原料作为对象, 采用瞬时高温灭菌试验对样品进行灭菌效果评价。由于植物饮料的水分活度和渗透压普遍处于较高水平, 因此, 在确定初始添加嗜热脂肪芽孢杆菌芽孢总含量(约 10⁴ CFU/mL)的条件下, 主要考察不同的 pH、黏度和固形物含量下样品的 UHT 杀菌效果。

2.2.1 pH 的影响

不同 pH(黏度都为 58.0 mPa · s, 固形物含量都为 40.5%)对样品中嗜热脂肪芽孢的灭菌效果分析结果显示, 在低 pH 和高温条件下的杀菌效果较好(表 1)。在 130 °C, pH 为 4.10 的条件下, 残存芽孢数量下降趋势最为明显(图 2)。对比相同 pH 下的不同温度灭菌效果可得, 在 120 °C 时, 延长其处理时间并不能显著提高杀菌效果(图 2A)。继续提高温度至 130 °C 和 140 °C 后, 随着杀菌时间的延长, 其杀菌效果逐渐增强(图 2C)。对芽孢杆菌耐热性的相关研究也表明, pH 高于 8 或低于 6, 都会降低孢子的耐湿热性, 随着 pH 进一步减小或增加, 该影响效应会增强^[19-20]。此外, 不同的产

芽孢 pH 环境也会对芽孢的耐热性产生影响, 在酸性 pH 环境中产生的芽孢杆菌孢子耐热性降低^[21]。这些结果都表明, 改变 pH 条件对芽孢的高温灭菌效果可能产生重要影响。

表 1 pH 对嗜热脂肪芽孢杆菌芽孢杀菌效果影响(×10³ CFU/mL)
Table 1 Effects of pH on the sterilization effect of *Bacillus stearothermophilus* spores (×10³ CFU/mL)

温度 / °C	时间 / s	3.30	4.10	5.00
120	-	5.76±0.96 ^a	4.68±1.26 ^a	5.62±0.70 ^a
	10	5.52±0.65 ^a	4.44±0.68 ^a	4.86±0.59 ^a
	20	4.38±0.62 ^a	3.84±0.59 ^a	4.84±0.78 ^a
	30	4.20±0.80 ^a	3.58±0.54 ^a	4.52±0.63 ^a
130	10	5.76±1.46 ^a	3.26±0.55 ^{ab}	2.88±0.55 ^b
	20	2.42±0.49 ^a	1.26±0.28 ^b	0.84±0.03 ^b
	30	1.58±0.34 ^a	0.72±0.14 ^b	1.18±0.11 ^a
	10	4.02±0.48 ^a	1.94±0.36 ^b	3.02±0.21 ^c
140	20	2.74±0.28 ^a	0.86±0.30 ^b	1.22±0.56 ^b
	30	2.16±0.33 ^a	0.86±0.29 ^b	1.36±0.10 ^c

注: 同一行中的不同字母表示差异显著(P<0.05), -表示无此项, 表 2、3 同。

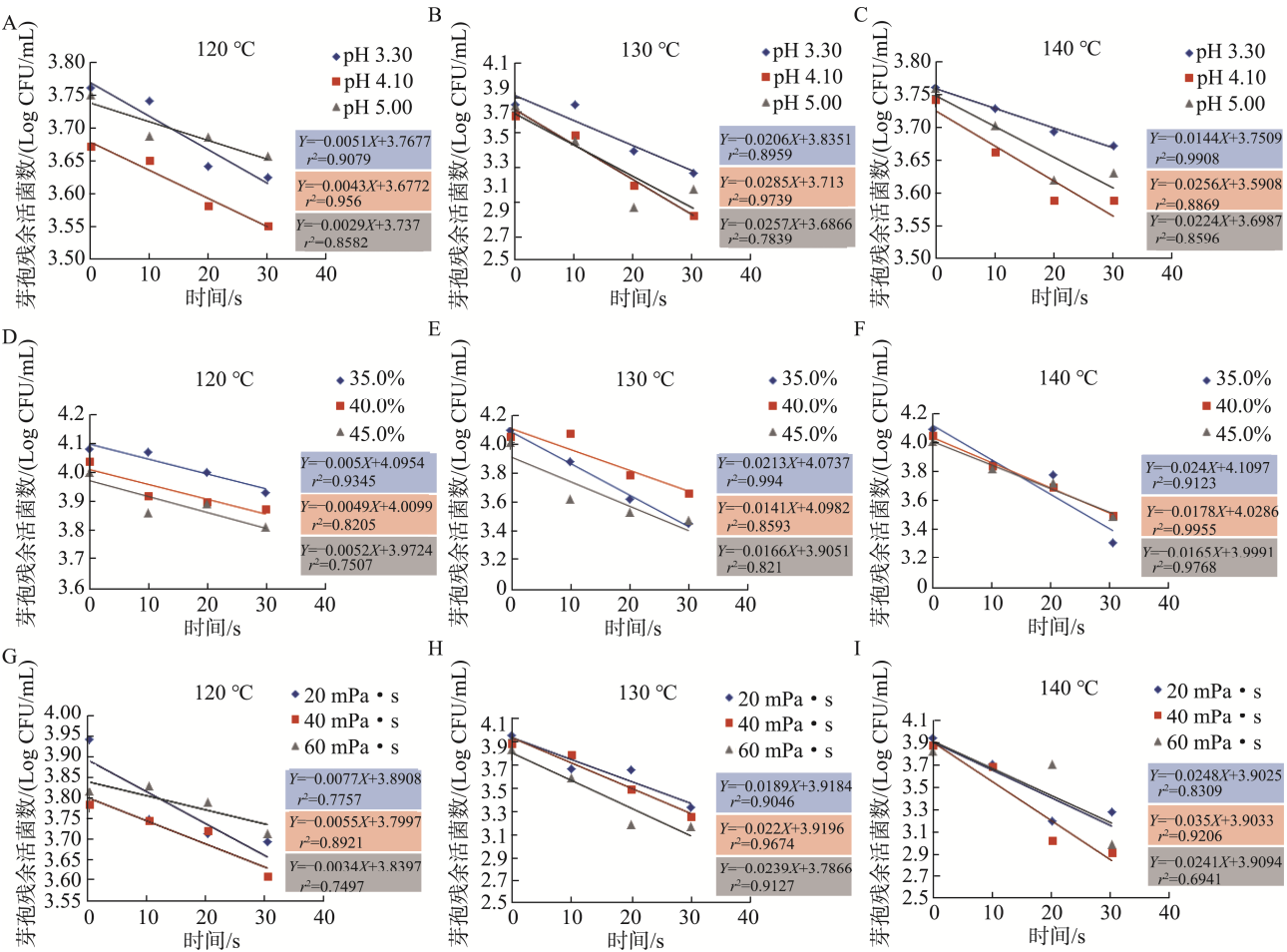


图 2 不同 pH (3.30、4.40、5.00, A~C)、黏度(20.0、40.0、60.0 mPa · s, D~F)、固形物含量(35.0%、40.0%、45.0%, G~I)和处理温度条件下的芽孢残余活力(Log CFU/mL)曲线
Fig.2 Residual activity curves of spores under different pH (3.30, 4.40, 5.00, A~C), viscosity (20.0, 40.0, 60.0 mPa · s, D~F), solid content (35.0%, 40.0%, 45.0%, G~I) and processing temperature conditions

2.2.2 固形物含量影响

调整饮料的固形物含量质量分数分别为 35.0%、40.0%、45.0%(对应的 pH 分别为 5.28、5.42、5.22, 黏度分别为 42.0、43.0、42.0 mPa·s)的条件下, 对样品中嗜热脂肪芽孢的灭菌效果分析结果显示, 在所选条件下, 改变固形物含量对芽孢的杀菌效果影响规律并不显著(图 2D~F)(表 2), 这可能与所选固形物含量的范围有关, 在该范围内, 固形物含量的变化难以引起样品热传递的变化, 导致其对芽孢的杀菌效果影响不明显。可溶性固形物的含量是由其中的糖类、有机酸等溶解性物质决定, 对饮料的品质和特性的影响主要表现在甜度、口感、保质期等方面^[15], 而对于饮料中芽孢的高温灭菌活力, 可能根据其可溶性物质的多样性产生不同的影响^[22]。

表 2 固形物含量对嗜热脂肪芽孢杆菌芽孢杀菌效果影响
($\times 10^3$ CFU/mL)

Table 2 Effects of solid content on the sterilization effect of *Bacillus stearothermophilus* spores ($\times 10^3$ CFU/mL)

温度 / $^{\circ}\text{C}$	时间 /s	35.0	40.0	45.0
-	0	12.00 $\pm$ 3.44 ^a	10.92 $\pm$ 2.06 ^a	10.00 $\pm$ 1.56 ^a
	10	11.68 $\pm$ 1.81 ^a	8.36 $\pm$ 1.44 ^{ab}	7.34 $\pm$ 0.30 ^b
	20	9.98 $\pm$ 0.89 ^a	8.00 $\pm$ 0.42 ^b	7.86 $\pm$ 0.58 ^b
120	30	8.62 $\pm$ 1.10 ^a	7.62 $\pm$ 0.85 ^{ab}	6.56 $\pm$ 0.35 ^b
	10	7.38 $\pm$ 0.63 ^a	11.58 $\pm$ 1.84 ^b	4.14 $\pm$ 0.24 ^c
	20	4.14 $\pm$ 0.16 ^a	6.04 $\pm$ 0.31 ^b	3.40 $\pm$ 0.46 ^a
130	30	2.84 $\pm$ 0.45 ^a	4.58 $\pm$ 0.31 ^b	2.98 $\pm$ 1.00 ^{ab}
	10	7.02 $\pm$ 0.45 ^a	6.76 $\pm$ 1.09 ^a	6.46 $\pm$ 0.25 ^a
	20	5.86 $\pm$ 0.10 ^a	4.86 $\pm$ 0.57 ^a	5.20 $\pm$ 1.40 ^a
140	30	2.02 $\pm$ 0.03 ^a	3.12 $\pm$ 0.49 ^b	3.04 $\pm$ 1.43 ^{ab}

2.2.3 黏度的影响

调整黏度分别为 20.0、40.0、60.0 mPa·s(对应的 pH 分别为 5.38、5.13、5.01, 固形物含量分别为 7.8%、22.2%、40.3%)的条件下, 对样品中嗜热脂肪芽孢的灭菌效果分析结果显示, 在 140℃, 黏度为 40.0 mPa·s 的条件下, 残存芽孢数量的下降趋势最为明显(图 2G~I)(表 3)。在 130℃的条件下, 随着黏度的提高, 残存芽孢数量的下降趋势有所增加。而在 120℃时, 改变黏度条件对芽孢的灭菌效果影响不明显, 这与芽孢在该温度下具有较高的耐受性有关^[23]。RYANG 等^[24]研究发现, 在半固态的豆酱中, 蜡样芽孢杆菌孢子具有较高的耐热性, 这与它们处于较高黏度(3×10^3 mPa·s)的环境有关, 受到厚基质和相对较差的对流热传导的保护。总体而言, 在已知 pH 对杀菌效果的影响较显著, 而固形物含量影响不显著的情况下, 可知黏度对于芽孢灭菌效果的影响可能略弱于 pH, 其主要原因可能是黏度条件影响了热量在饮料中的传递^[25], 进而改变了芽孢高温杀菌所需的时间。

表 3 黏度对嗜热脂肪芽孢杆菌芽孢杀菌效果影响
($\times 10^3$ CFU/mL)

Table 3 Effects of viscosity on the sterilization effect of *Bacillus stearothermophilus* spores ($\times 10^3$ CFU/mL)

温度 / $^{\circ}\text{C}$	时间 /s	20.0	40.0	60.0
-	0	8.74 $\pm$ 1.08 ^a	7.44 $\pm$ 0.68 ^{ab}	6.56 $\pm$ 0.79 ^b
	10	5.60 $\pm$ 1.83 ^a	6.12 $\pm$ 3.66 ^a	6.76 $\pm$ 0.27 ^a
	20	5.20 $\pm$ 0.84 ^a	5.28 $\pm$ 0.42 ^a	6.04 $\pm$ 0.43 ^a
120	30	4.96 $\pm$ 1.23 ^a	4.10 $\pm$ 0.18 ^a	5.20 $\pm$ 0.75 ^a
	10	4.42 $\pm$ 0.29 ^a	5.92 $\pm$ 0.51 ^b	3.72 $\pm$ 0.51 ^a
	20	4.36 $\pm$ 1.14 ^a	3.00 $\pm$ 0.38 ^{ab}	1.48 $\pm$ 0.94 ^b
130	30	2.06 $\pm$ 0.56 ^a	1.72 $\pm$ 0.20 ^a	1.42 $\pm$ 0.43 ^a
	10	5.02 $\pm$ 0.46 ^a	4.86 $\pm$ 2.16 ^a	3.58 $\pm$ 1.88 ^a
	20	1.58 $\pm$ 0.35 ^a	1.08 $\pm$ 0.05 ^a	3.86 $\pm$ 2.02 ^a
140	30	1.92 $\pm$ 0.11 ^a	0.84 $\pm$ 0.35 ^b	1.00 $\pm$ 0.26 ^b

2.2.4 不同条件下的灭菌 F 值分析

根据芽孢残余活力曲线(图 2), 计算不同 pH、黏度和固形物含量条件的样品杀菌 F 值(表 4)。通过对 120、130、140℃的 F 值进行连续拟合计算, 得到不同条件组的 F_0 (F_{121})值。随着 pH 的降低其 F_0 值逐渐减小, 即杀菌时间越短。相比 pH 5.00, pH 3.30 所得到的 F_0 值减少 43%, 也即杀菌时间显著缩短。对于固形物含量的影响, 不同固形物含量条件下, F_0 值并无显著变化规律, 也即在所选的条件下, 固形物含量对杀菌效果影响影响较小。因此, 在不考虑固形物含量影响的情况下, 随着黏度的增加, 其 F_0 值整体显著提高, 即高黏度物料所需的杀菌时间更长, 相比于 20.0 mPa·s 黏度样品, 60.0 mPa·s 黏度样品的杀菌时间提升 1.2 倍。这些结果与以往的研究发现相符合, 实现微生物灭活的最高热负荷点, 通常受到黏度、pH、成分等的影响, 并与饮料产品的最终外观和风味品质密切相关^[26]。

表 4 不同条件组合下的芽孢灭菌 F 值

Table 4 F value of spore sterilization under different combinations of conditions

条件组	pH	黏度 /($\text{mPa}\cdot\text{s}$)	固形物 含量/%	F/s			F_0
				120℃	130℃	140℃	
A	3.30	58.0	40.5	784	194	278	695
B	4.10	58.0	40.5	930	140	156	816
C	5.00	58.0	40.5	1379	156	179	1203
D	5.38	20.0	7.8	519	212	161	478
E	5.13	40.0	22.2	727	182	114	650
F	5.01	60.0	40.3	1176	167	166	1026
G	5.28	42.0	35.0	800	188	167	713
H	5.42	43.0	40.0	816	284	225	741
I	5.22	42.0	45.0	769	241	242	691

2.3 UHT 杀菌模型构建

2.3.1 线性回归模型构建

根据计算获得的 F_0 值, 使用 lm (Linear Model)函数建立线性拟合回归模型, 模型为 $F_0(1)=pH+Viscosity+Solid$ 。结果显示(表 5), 模型公式中的截距(Intercept)、pH、黏度(Viscosity)、固形物含量(Solid)拟合系数分别为-1137.884、208.927、23.767、-6.124。其中, 截距、pH、黏度的系数 P 都小于 0.05, 表明 pH 和黏度因素在该模型中对 F_0 值的影

响显著, 而固形物含量因素不显著, 说明 pH 和黏度可能是影响 UHT 杀菌效果的关键因素^[27]。Multiple R-squared (R^2)和 Adjusted R-squared(调整后的 R^2)分别为 0.8684 和 0.7894, 表明模型能够解释因变量 F_0 值变异的 86.84%, 以及在考虑模型中自变量数量的影响后可达到 78.94%。模型对应的 P 为 0.012, 表明模型中存在自变量对 F_0 有显著影响。因此, 最终拟合得到的线性模型公式为: $F_0(1)=208.927\times pH+23.767\times Viscosity-6.124\times Solid-1137.884$ 。

表 5 线性回归模型构建及参数
Table 5 Construction and parameters of linear regression model

温度/℃		预测系数	标准误差	<i>t</i> 值	Pr 值	残差标准 误差	多重/调整 R^2 值	<i>F</i> 统计量 / <i>P</i>
121	Intercept	-1137.884	428.649	-2.655	0.045*	98.69	0.8684/ 0.7894	11.00/ 0.012
	pH	208.927	64.272	3.251	0.023*			
	Viscosity	23.767	5.452	4.360	0.007**			
	Solid	-6.124	5.085	-1.204	0.282			
110	Intercept	-4559.900	1693.200	-2.693	0.043*	389.80	0.8641/ 0.7826	10.60/ 0.013
	pH	691.430	253.880	2.723	0.042*			
	Viscosity	95.570	21.530	4.438	0.007**			
	Solid	-30.150	20.090	-1.501	0.194			
115	Intercept	-2777.730	1016.880	-2.732	0.041*	234.10	0.8671/ 0.7873	10.87/ 0.012
	pH	441.890	152.470	2.898	0.034*			
	Viscosity	57.870	12.930	4.475	0.007**			
	Solid	-17.610	12.060	-1.460	0.204			
120	Intercept	-1380.690	502.830	-2.746	0.041*	115.80	0.8723/ 0.7957	11.39/ 0.011
	pH	243.703	75.395	3.232	0.023*			
	Viscosity	28.661	6.395	4.482	0.007**			
	Solid	-7.766	5.965	-1.302	0.250			
125	Intercept	-343.209	189.092	-1.815	0.129	43.53	0.8327/ 0.7324	8.30/ 0.022
	pH	93.347	28.353	3.292	0.022*			
	Viscosity	7.666	2.405	3.188	0.024*			
	Solid	-0.503	2.243	-0.224	0.831			
130	Intercept	302.825	142.706	2.122	0.087	32.85	0.6598/ 0.4557	3.23/ 0.120
	pH	-4.677	21.398	-0.219	0.836			
	Viscosity	-4.810	1.815	-2.650	0.045*			
	Solid	4.069	1.693	2.403	0.061			
135	Intercept	392.525	133.654	2.937	0.032*	30.77	0.6535/ 0.4456	3.14/ 0.125
	pH	-28.940	20.040	-1.444	0.208			
	Viscosity	-4.777	1.700	-2.810	0.038*			
	Solid	4.720	1.585	2.977	0.031*			
140	Intercept	482.882	150.835	3.201	0.024*	34.73	0.7076/ 0.5321	4.03/ 0.084
	pH	-53.096	22.616	-2.348	0.066			
	Viscosity	-4.748	1.918	-2.475	0.056			
	Solid	5.350	1.789	2.990	0.030*			

注: **表示差异极显著($P<0.01$); *表示差异显著($P<0.05$), 表 6 同。

此外, 分别对 110、115、120、125、130、135 和 140 °C 的杀菌 F 值进行线性回归模型构建。数据分析结果表明, 在 110~125 °C 的区间内, 固形物含量的影响效果无显著性。当温度提高至 130~140 °C 时, pH 的影响效果显著性逐渐减弱, 而固形物含量的影响效果显著性增强, P 可降低至约 0.03, 这可能与大分子糖类物质在高温条件下与蛋白质的聚集络合作用相关^[28], 对芽孢的高温灭活效果造成影响。此外, 模型的 F 统计量(F -statistic)的显著性大于 0.05, 表明模型中所有自变量整体上对响应变量无显著影响。针对 UHT 灭菌乳货架期建立多因素回归方程模型的研究显示, 乳品中各指标的变化规律可能成指对数的趋势变化, 可能对于线性方程造成误差影响^[29]。而本研究则发现, pH 和固形物含量因素对于芽孢高温杀菌效果的影响显著性, 可能随着杀菌温度的改变而发生变化, 黏度因素的影响显著性则较为稳定, 表明线性回归模型可以具备较好的预测稳定性。

2.3.2 非线性最小二乘(混合效应)回归模型构建

基于已建立的线性回归模型结构特征, 考虑建立非线性回归模型进行补充验证, 实现更高精度的拟合效应, 因此使用 nls (Nonlinear Least Squares)函数建立非线性最小二乘回归模型, 公式为 $F_0(2)=a \times \text{pH} + b \times \text{viscosity} + c \times \text{viscosity_squared} + d \times \text{solid}$ 。根据不同 pH、黏度、固形物含量条件下的灭菌芽孢残余数量, 预设初始线性系数($a=200$, $b=-10$, $c=1$, $d=1$)。模型的构建结果显示(表 6), 系数 a 和 c 的 P 小于 0.05, 表明 pH 和黏度(二次方变量, viscosity_squared)在该模型中具有显著性拟合效应, 对 F_0 值有显著影响。 b 和 d 的 P 大于 0.05, 表明黏度(一次方变量, viscosity)和固形物含量因素对 F 值的影响效应不显著。模型的算法在迭代后达到的收敛容差是 2.26e-08, 表明模型优化过程成功。最终拟合得到的模型为: $F_0(2)=171.067 \times \text{pH} - 30.805 \times \text{viscosity} + 0.543 \times \text{viscosity_squared} + 3.452 \times \text{solid}$ 。

表 6 非线性最小二乘回归模型构建及参数
Table 6 Construction and parameters of nonlinear least squares regression model

温度/°C		预测系数	标准误差	t 值	Pr 值	残差标准误差	实现收敛限值
121	a	171.067	51.966	3.292	0.022*	100.00	2.26e-08
	b	-30.805	17.618	-1.748	0.141		
	c	0.543	0.209	2.594	0.049*		
	d	3.452	5.425	0.636	0.553		
110	a	535.126	207.927	2.574	0.049*	400.20	1.343e-07
	b	-121.484	70.495	-1.723	0.145		
	c	2.154	0.837	2.574	0.049*		
	d	8.014	21.706	0.369	0.727		
115	a	345.387	125.685	2.748	0.040*	241.90	2.01e-07
	b	-73.894	42.612	-1.734	0.143		
	c	1.307	0.506	2.583	0.049*		
	d	5.578	13.120	0.425	0.688		
120	a	196.435	61.777	3.180	0.025*	118.90	7.637e-08
	b	-37.082	20.945	-1.770	0.137		
	c	0.653	0.249	2.624	0.047*		
	d	3.792	6.449	0.588	0.582		
125	a	86.325	20.891	4.132	0.009**	40.21	8.716e-08
	b	-10.362	7.083	-1.463	0.203		
	c	0.183	0.084	2.173	0.082		
	d	2.589	2.181	1.187	0.288		
130	a	17.248	21.149	0.816	0.452	40.70	1.235e-07
	b	5.488	7.170	0.765	0.479		
	c	-0.093	0.085	-1.091	0.325		
	d	2.069	2.208	0.937	0.392		
135	a	7.278	24.578	0.296	0.779	47.30	1.256e-07
	b	5.792	8.333	0.695	0.518		
	c	-0.087	0.099	-0.875	0.422		
	d	2.489	2.566	0.97	0.377		
140	a	-2.580	30.211	-0.085	0.935	58.14	5.163e-07
	b	6.128	10.243	0.598	0.576		
	c	-0.081	0.122	-0.663	0.537		
	d	2.882	3.154	0.914	0.403		

此外, 分别对 110、115、120、125、130、135 以及 140 °C 的杀菌 F 值进行非线性回归模型构建。数据分析结果表明, 在 110~120 °C 的区间内, pH 和黏度 (viscosity_squared) 的影响都具有显著性 ($P<0.05$), 而 pH 在 125 °C 时极显著 ($P<0.01$)。当温度提高到 130 °C 以上后, pH 和黏度对杀菌 F 值的影响不再具有显著性。林雅文等^[30]针对南美白对虾中短波红外干燥建立的非线性模型也表明, 使用二阶多项式回归方程, 可以有效预测水分比随干燥温度和时间的变化, 而随着温度的升高和时间的延长, 水分比的减小更加明显。这与本研究中模型的表现特征相似, 即温度的升高易弱化其他因素的影响。固形物含量在不同温度条件下, 对 F 值无显著影响。这些结果表明, 非线性最小二乘回归模型中, pH 和黏度对杀菌 F 值的影响显著性, 主要显现在低于 130 °C 的温度范围。随着 pH 和黏度值的增加, 杀菌效果呈减弱趋势。进一步提高温度后, 该模型的预测能力有所下降。SUNDS 等^[31]关于 UHT 牛奶储存温度波动对其质量的影响建模研究也明确指出, 温度的升高 (20~50 °C) 对于饮料保质期内的质量改变具有重要影响, 与 L^* 的降低以及 a^* 和 b^* 的增加呈线性相关 ($P<0.05$), 反应动力模型在不同温度区间内的构建形式具有阶段性的温度敏感性和动力学特征。

2.3.3 模型构建评价

根据建立的线性模型 [$F_0(1)$] 和非线性模型 [$F_0(2)$] 进行 F_0 值拟合预测。结果显示, 在不同的条件组中, 线性和非线性模型的拟合预测值和实际检测的 F_0 值之间, 都呈现总体接近的趋势, 两者的拟合趋势 R^2 分别为 0.868 和 0.869 (表 7), 表明预测性较好。其中, 线性模型的预测性能较为简便直接, 而非线性模型的预测结果总体略微偏大 (图 3), 这对于实际生产活动中的灭菌效果和货架期可能具有更大的保障。SINGH 等^[32]在针对 UHT 处理牛奶储存期劣化过程的建模研究中也发现, 针对特定饮料产品的 UHT 预测模型在基于动力学模型和人工神经网络的不同构建方式下, 其预测性能会受到理化特性参数的影响 (R^2 变化区间为 0.76~0.98) 而表现出不同的预测权重。

表 7 线性和非线性回归模型 F_0 值拟合预测

Table 7 F_0 value fitting prediction of linear and nonlinear regression models

条件组	F_0	线性回归模型		非线性最小二乘回归模型	
		$F_0(1)$	R^2/AIC	$F_0(2)$	R^2/AIC
A	695	682	0.868/ 107.650	744	0.869/ 106.490
B	816	849		881	
C	1203	1037		1035	
D	478	414		548	
E	650	749		591	
F	1026	1086		1101	
G	713	749		688	
H	741	772		745	
I	691	675		712	

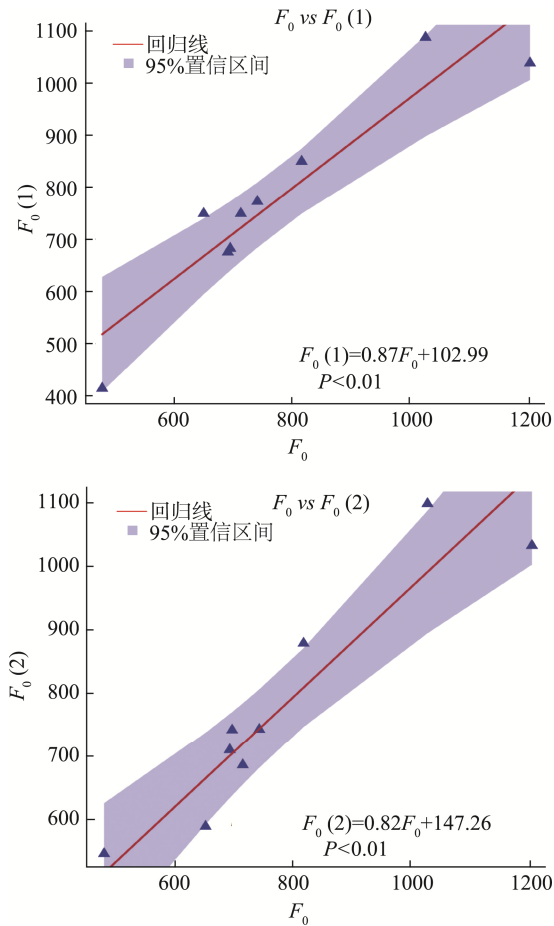


图 3 线性和非线性回归模型的 F_0 值拟合趋势
Fig.3 F_0 value fitting trend of linear and nonlinear regression models

3 结 论

基于 6 种不同 FPD 的理化特性分析评价结果, 选取清润饮料作为 UHT 主要实验对象, 以嗜热脂肪芽孢高温杀菌残余活力为检测指标, 构建 UHT 杀菌 F 值回归模型。通过建立线性(lm)和非线性最小二乘(nls)回归模型进行杀菌 F_0 值拟合, 发现 pH 和黏度因素对 FPD 的 UHT 杀菌效果影响显著 ($P<0.05$), 二者的变量值和 F_0 值之间都呈现相关趋势。pH 和黏度的 F_0 值线性拟合系数和非线性拟合系数结果表明随着 pH 和黏度值的增加, 杀菌效果呈减弱趋势, 而固形物含量则呈现出对 F_0 值的不显著影响。对不同温度条件下的杀菌 F 值进行回归模型构建, 发现随着杀菌温度的提高, 在线性模型中, pH 的影响效应显著程度降低, 而固形物含量的影响效应显著程度增强, P 降低至约 0.03; 在非线性模型中, pH 和黏度因素对模型整体的影响效应显著性都逐渐下降。表明在 130~140 °C 高温杀菌条件下, 饮料的 pH 和黏度理化特性对芽孢的杀菌 F 值影响相对较小。模型 $F_0(1)$ 和 $F_0(2)$ 的预测值和实际检测 F_0 值总体接近, 拟合趋势 R^2 分别达到 0.868 和 0.869, 证明模型具备良好的预测

性能。研究结果对于指导 FPD 的 UHT 工艺设计, 减少过度杀菌造成的风味和营养成分损失, 都具有重要意义。

参考文献

- [1] PÉREZ-RODRÍGUEZ ML, SERRANO-CARRETERO A, GARCÍA-HERRERA P, *et al.* Plant-based beverages as milk alternatives? Nutritional and functional approach through food labeling [J]. Food Research International, 2023, 173: 113244.
- [2] 张俊超, 张献忠, 沈金金, 等. 果蔬汁饮料新型非热灭菌技术研究及应用进展[J]. 农产品加工, 2020, 22: 93–97.
ZHANG JC, ZHANG XZ, SHEN JJ, *et al.* Research development of novel non-thermal sterilization technology for fruit and vegetable juice beverages [J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2020, 22: 93–97.
- [3] AGANOVIC K, HERTEL C, VOGEL RF, *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.
- [4] AKDENIZ V, AKALIN AS. Recent advances in dual effect of power ultrasound to microorganisms in dairy industry: Activation or inactivation [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(4): 889–904.
- [5] DELORME MM, GUIMARÃES JT, COUTINHO NM, *et al.* Ultraviolet radiation: An interesting technology to preserve quality and safety of milk and dairy foods [J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 102: 146–154.
- [6] 郭伟鹏, 吴清平, 张菊梅, 等. 果汁饮料中耐热霉菌的分离和鉴定研究[J]. 生物技术通报, 2008(S1): 244.
GUO WP, WU QP, ZHANG JM, *et al.* Studies on the isolation and identification of heat-resistant molds in juice beverage [J]. Biotechnology Bulletin, 2008(S1): 244.
- [7] 邓腾. 植物饮料提取液中微生物的分离鉴定及耐热性研究[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(23): 161–164.
DENG T. Study on isolation and identification and thermal resistance of thermophilic microorganisms in the plant beverage extracts [J]. Food Research and Development, 2016, 37(23): 161–164.
- [8] ALCÂNTARA NE, TAVARES FER, PIMENTEL TC, *et al.* Assessment of Brazilian consumers' perception about the presence of stabilisers in UHT milk: A study using virtual focus groups [J]. International Journal of Dairy Technology, 2023, 76(3): 669–682.
- [9] SINGH R, RATHOD G, MELETHARAYIL GH, *et al.* Invited review: Shelf-stable dairy protein beverages-Scientific and technological aspects [J]. Journal of Dairy Science, 2022, 105(12): 9327–9346.
- [10] MAITZ S, POELZL S, DREISIEBNER D, *et al.* Antimicrobial non-porous surfaces: A comparison of the standards and the recently published [J]. Frontiers in Microbiology, 2024, 15: 1400265.
- [11] 吕玉翠. 豆浆和大豆浓缩蛋白乳的热处理对其品质的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2013.
LV YC. Effects of thermal processes on the quality of soymilk and soy protein concentrate milk [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013.
- [12] 肖七琪, 陈彪, 张怡, 等. 注射剂药品 F₀ 值及灭菌验证方法探讨[J]. 科技视界, 2012(34): 136–137.
XIAO QQ, CHEN B, ZHANG Y, *et al.* Discussion on F₀ value and sterilization verification method of injection drugs [J]. Science & Technology Vision, 2012(34): 136–137.
- [13] SHAO C, XIANG D, WEI H, *et al.* Predicting virulence of *Fusarium oxysporum* f. sp. *Cubense* based on the production of mycotoxin using a linear regression model [J]. Toxins, 2020, 12(4): 254.
- [14] KOÇER AG, KEKLIK NM. Modeling of *Listeria monocytogenes* survival and quality attributes of sliced mushroom (*Agaricus bisporus*) subjected to pulsed UV light [J]. Journal of Food Process Engineering, 2021, 44(1): e13605.
- [15] NGUYEN QV, CHUYEN HV. Processing of herbal tea from roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.): Effects of drying temperature and brewing conditions on total soluble solid, phenolic content, antioxidant capacity and sensory quality [J]. Beverages, 2020, 6(1): 2.
- [16] RAMAMURTHY T, KRISHNAN S. Influence of viscosity on the thermal behavior of fluids in a sealed can [J]. Alexandria Engineering Journal, 2022, 61(10): 7833–7842.
- [17] ALEGBELEYE O, ODEYEMI OA, STRATEVA M, *et al.* Microbial spoilage of vegetables, fruits and cereals [J]. Applied Food Research, 2022, 2(1): 100122.
- [18] GIRARD B, FUKUMOTO LR. Membrane processing of fruit juices and beverages: A review [J]. Critical Reviews in Food Science Nutrition, 2000, 40(2): 91–157.
- [19] SETLOW P. Spore resistance properties [J]. The bacterial spore: from Molecules to Systems, 2016, 1: 201–215.
- [20] RODRÍGUEZ-LOZANO A, CAMPAGNOLI M, JEWEL K, *et al.* *Bacillus* spp. thermal resistance and validation in soups [J]. Current Research, Technology and Education Topics in Applied Microbiology and Microbial Biotechnology, 2010, 1: 537–544.
- [21] BARIL E, COROLLER L, COUVERT O, *et al.* Modeling heat resistance of *Bacillus weihenstephanensis* and *Bacillus licheniformis* spores as function of sporulation temperature and pH [J]. Food Microbiology, 2012, 30(1): 29–36.
- [22] EVELYN, UTAMI SP, CHAIRUL. Effect of temperature and soluble solid on *Bacillus subtilis* and *Bacillus licheniformis* spore inactivation and quality degradation of pineapple juice [J]. Food Science and Technology International, 2022, 28(4): 285–296.
- [23] KANAAN J, MURRAY J, HIGGINS R, *et al.* Resistance properties and the role of the inner membrane and coat of *Bacillus subtilis* spores with extreme wet heat resistance [J]. Journal of Applied Microbiology, 2022, 132(3): 2157–2166.
- [24] RYANG JH, KIM NH, LEE BS, *et al.* Destruction of *Bacillus cereus* spores in a thick soy bean paste (doenjang) by continuous ohmic heating with five sequential electrodes [J]. Letters in Applied Microbiology, 2016, 63(1): 66–73.
- [25] SOMAN DP, KARTHIKA S, KALAICHELV P, *et al.* Impact of viscosity of nanofluid and ionic liquid on heat transfer [J]. Journal of Molecular Liquids, 2019, 291: 111349.
- [26] MCCARTHY NA, MAGAN JB, KELLEHER CM, *et al.* Heat treatment of milk: Effect on concentrate viscosity, powder manufacture and end-product functionality [J]. International Dairy Journal, 2022, 128: 105289.
- [27] WANG S, LI Y, YAN G, *et al.* Thickening mechanism of recombined dairy cream stored at 4 °C: Changes in the composition and structure of milk protein under different sterilization intensities [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 227: 903–914.
- [28] IQBAL S, ZHANG P, WU P, *et al.* Impact of fat content on the modulation of viscosity, microstructure and enzymatic hydrolysis of UHT milk during simulated gastrointestinal digestion [J]. International Journal of Dairy Technology, 2024, 77(1): 59–70.
- [29] 程方键, 陈晓民, 盛玉娟, 等. 超高温灭菌乳货架期影响因素及预测模型研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(17): 282–291.
CHENG FJ, CHEN XM, SHENG YJ, *et al.* Progress of research on influencing factors and prediction models of ultra-high temperature treated milk shelf life [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(17): 282–291.
- [30] 林雅文, 刘佳晨, 牛慧玲, 等. 南美白对虾中短波红外干燥特性及模型拟合[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(9): 137–145.
LIN YW, LIU JC, NIU HL, *et al.* Medium-short-wave infrared drying characteristics and model fitting of *Penaeus vannamei* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(9): 137–145.
- [31] SUNDS AV, RAUH VM, SØRENSEN J, *et al.* Maillard reaction progress in UHT milk during storage at different temperature levels and cycles [J]. International Dairy Journal, 2018, 77: 56–64.
- [32] SINGH RRB, RUHIL AP, JAIN DK, *et al.* Prediction of sensory quality of UHT milk-a comparison of kinetic and neural network approaches [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 92(2): 146–151.

(责任编辑: 于梦娇 安香玉)