

李朝阳, 王 珊, 何欢承, 等. 基于纳米气泡与曝气协同的自来水绿色清洗技术开发[J]. 净水技术, 2026, 45(6): 73-83.

Li Z Y, Wang S, He H C, et al. Development of green cleaning technology for tap water based on nano-bubbles [J]. Water Purification Technology, 2026, 45(6): 73-83.

基于纳米气泡与曝气协同的自来水绿色清洗技术开发

李朝阳¹, 王 珊^{2,3}, 何欢承^{2,3}, 张 军¹, 霍彦强^{2,3}, 胡 楠⁴, 李 攀^{4,*}

(1. 黑龙江大学建筑工程学院, 黑龙江哈尔滨 150080; 2. 宁波方太厨具有限公司, 浙江宁波 315336; 3. 健康智慧厨房浙江省工程研究中心, 浙江宁波 315336; 4. 同济大学环境与工程学院, 上海 200092)

摘要 【目的】随着公众对生活品质追求的提升, 家用自来水的功能已从单一饮用向多元化清洗场景拓展。针对传统化学清洗剂存在残留风险及环境污染的问题, 开发基于水介质的高效物理清洗技术成为实现“健康自来水”功能化延伸的关键。本文旨在开发一种基于纳米气泡与曝气协同的非热物理清洗技术, 通过强化传质效率, 提升家用自来水对食材中食源性风险因子(以嘌呤为例)的去除效能, 为构建绿色、高效的家庭清洗方案提供科学依据。【方法】采用加压溶解-减压释放法制备纳米气泡水。以鸡肉为模型基质, 通过单因素及 $L_{16}(4^3)$ 正交试验系统优化了纳米气泡协同曝气工艺的关键参数(释放压力、浸泡与曝气时间比、曝气量)。利用高效液相色谱(HPLC)定量分析处理前后食材中总嘌呤及各组分含量, 并结合扫描电子显微镜(SEM)与溶解动力学模型, 深入解析该技术改变食材微观结构及强化污染物传质的协同机理。【结果】纳米气泡与曝气在清洗过程中存在显著的协同增效作用, 其处理效果优于单独纳米气泡浸泡及常规自来水处理。在最优工艺条件(释放压力为 2 kg/cm^2 、浸泡/曝气时间比为 $3 \text{ min} : 9 \text{ min}$ 、曝气量为 42%)下, 鸡肉总嘌呤去除率达到 31.01% , 是自来水浸泡去除率(2.57%)的 12 倍。该工艺具有良好的普适性, 对猪里脊(去除率为 35.74%)、牛肉、黄鱼等多种食材均显示出显著的清洗效果($>25\%$), 但受食材质地影响, 对鲈鱼和蛭子的去除率相对较低($<16.24\%$)。SEM 微观形貌观察显示, 处理后的鸡肉表面致密肌纤维结构转变为疏松的多孔网络。【结论】机理分析表明, 纳米气泡在固液界面诱导空化效应产生微裂纹, 而曝气产生的宏观剪切力进一步扩展裂纹通道, 形成高渗透性结构。这种“微观空化-宏观剪切”的协同机制显著降低了传质阻力, 加速了次黄嘌呤等目标污染物的溶出速率。该技术作为非热加工技术, 避免了高温导致的热敏性营养素流失。本文证实了纳米气泡协同曝气技术作为一种绿色、非热物理手段, 能有效提升自来水的清洗介质功能, 为拓展“健康自来水”的应用场景及降低饮食健康风险提供了创新途径。

关键词 纳米气泡; 嘌呤; 曝气; 物理清洗; 强化传质

中图分类号: TU991 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)06-0073-11

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.06.008

Development of Green Cleaning Technology for Tap Water Based on Nano-bubbles

Li Zhaoyang¹, Wang Shan^{2,3}, He Huancheng^{2,3}, Zhang Jun¹, Huo Yanqiang^{2,3}, Hu Nan⁴, Li Pan^{4,*}

(1. College of Civil Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150080, China;

2. Ningbo Fotile Kitchen Ware Co., Ltd., Ningbo 315336, China;

3. Zhejiang Provincial Engineering Research Center for Healthy & Smart Kitchen, Ningbo 315336, China;

4. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract [Objective] With the public's pursuit of a higher quality of life, the function of household tap water has expanded from simple drinking to diversified cleaning scenes. In response to the risks of residue and environmental pollution posed by traditional chemical cleaning agents, the development of efficient physical cleaning technology based on water medium has become a key to realizing the functional extension of "healthy tap water". This paper aims to develop a non-thermal physical cleaning technology based on the synergy of nanobubbles and aeration, by enhancing mass transfer efficiency, to improve the removal efficiency of foodborne risk

[收稿日期] 2025-12-25

[作者简介] 李朝阳(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为纳米气泡生成及应用, E-mail: li01170@163.com。

[通信作者] 李攀(1980—), 女, 副教授, 研究方向为微纳米气泡技术, E-mail: lipan@tongji.edu.cn。

factors (taking purines as an example) in food by household tap water, providing a scientific basis for the construction of a green and efficient household cleaning solution. [Methods] Nanobubble water was prepared by the pressurized dissolution-depressurization release method. Using chicken as the model matrix, the key parameters of the nanobubble and aeration synergy process (release pressure, soaking and aeration time ratio, aeration volume) were systematically optimized through single-factor and $L_{16}(4^3)$ orthogonal experiments. The total purine and its components in food before and after treatment were quantitatively analyzed by high-performance liquid chromatography (HPLC), and the synergistic mechanism of this technology in changing the microstructure of food and enhancing the mass transfer of pollutants was deeply analyzed by combining scanning electron microscopy (SEM) and dissolution kinetics models. [Results] There was a significant synergistic enhancement effect between nanobubbles and aeration in cleaning process, and its treatment effect was better than that of nanobubble soaking alone and conventional tap water treatment. Under the optimal process conditions (release pressure was 2 kg/cm^2 , soaking: aeration time ratio was 3 min : 9 min, aeration volume was 42%), the total purine removal rate of chicken reached 31.01%, which was 12 times that of tap water soaking (2.57%). This process had good universality and showed significant cleaning effects ($>25\%$) on various foods such as pork tenderloin (removal rate was 35.74%), beef, and yellow croaker, but the removal rate was relatively low ($<16.24\%$) for sea bass and clams due to the influence of food texture. SEM microscopic morphology observation showed that the dense muscle fiber structure on the surface of the treated chicken transformed into a loose porous network. [Conclusion] Mechanism analysis indicates that nanobubbles induce cavitation effects at the solid-liquid interface to generate microcracks, while the macroscopic shear force generated by aeration further expands the crack channels, forming a highly permeable structure. This "microscopic cavitation-macroscopic shear" synergistic mechanism significantly reduces mass transfer resistance and accelerates the dissolution rate of target pollutants such as hypoxanthine. This technology, as a non-thermal processing technique, avoids the loss of heat-sensitive nutrients caused by high temperatures. This paper confirms that the nanobubble and aeration synergy technology, as a green and non-thermal physical method, can effectively enhance the cleaning medium function of tap water, providing an innovative approach to expanding the application scenes of "healthy tap water" and reducing dietary health risks.

Keywords nanobubbles(NBs); purine; aeration; physical cleaning; enhanced mass transfer

水是生命之源,安全、健康的自来水是保障公众健康和提高生活质量的关键。随着社会的发展,公众对自来水的期望已从满足基本的安全卫生标准,逐步转向追求具备额外健康益处的“功能水”。在家用场景中,自来水除直接饮用/食用外,更被大量地用作清洗介质,涵盖了食材准备、器具清洗、衣物洗涤等多个方面。以往的水研究^[1-2]主要关注自来水的品质,而忽略了自来水作为清洗介质的功能。因此传统家用清洗主要依赖化学合成的界面活性剂提升清洗效率,但是化学清洗剂残留会危害健康,排放后有污染环境的风险。尤其对于食材清洗处理,化学清洗剂的使用更加受限^[3]。因此,开发基于水介质的物理清洗强化技术,通过提升污染物的传质效率以降低食源性健康风险,使自来水成为一种更高效、绿色的清洗媒介,是“健康自来水”概念的重要延伸。

纳米气泡(NBs)技术作为一种物理清洗技术在界面清洗方面展现出巨大潜力。NBs 因其独特的物理化学性质——极高的比表面积、界面 Zeta 电位,以及溃灭时产生的局部高温高压与冲击波,在界面

清洗方面展现出巨大潜力^[4-5]。家庭食材清洗是去除果蔬中尘土及农残最常见的方式,但是许多农药具有疏水性,使其更容易吸附在植物表皮的蜡质层,而非溶于水中被冲走^[6]。实证研究^[7]表明,臭氧 NBs 是一种去除水果中农残的有效技术,而且对苹果表面色度无显著影响,也不会对苹果造成物理损伤。应用二氧化碳(CO_2) NBs 水处理鲜切葱,能够有效地抑制鲜切葱表面的菌落总数降低鲜切葱变质速度,实现保鲜期的延长^[8]。使用微酸性次氯酸 NBs 处理肉类及果蔬 9 min,可使大肠杆菌杀灭率 $>97.35\%$,且减少氯制剂用量 50% 以上^[9]。因此, NBs 技术有望成为一种能够提升自来水清洗能力且无二次污染的绿色清洗技术。

本文以食材中嘌呤为清洗去除对象,这是因为高嘌呤饮食是诱发高尿酸血症及相关代谢性疾病的关键风险因素^[10]。目前,家庭和工业中普遍采用焯水、炖煮等热处理方式来降低食材中的嘌呤含量。对羊肉采用不同烹饪方式处理 15 min,总嘌呤变化十分显著:煮制降低 53.28%;蒸制降低 30.59%;烤制降低 24.82%,而炒制则增加 22.14%^[11]。然而这

种长时间的热处理不仅耗时,更会导致大量水溶性维生素、氨基酸等有益营养成分随嘌呤一同溶出流失,显著降低了食品的营养价值与风味^[12]。此外,高温处理会导致肌原纤维蛋白变性收缩,使肉质老化、口感变柴^[13]。基于NBs的特性开发物理强化清洗技术,有望实现高效去除嘌呤的同时最大限度保留食品原有品质。

本文重点阐述“NBs与曝气协同”技术,在缩短处理时间(12 min)的同时,最大限度保留食品营养成分与感官品质,提升家用自来水健康清洗的效能。通过正交试验优化NBs的释放压力、曝气量等关键工艺参数,评估该技术在多种肉类及水产品中的嘌呤清洗应用效果,并结合微观结构表征与溶解动力学分析,深入揭示强化清洗的传质机理。本文成果将为提升家用自来水的清洗能力提供全新的解决思路。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试剂

试验用水:上海市市政自来水

食品样品:试验采用鸡胸肉为清洗效能的主要研究对象;采用猪里脊、牛肉、鳕鱼、黄鱼、带鱼、蛭子等为主要技术验证对象。以上食材均通过生鲜电商

平台采购,所有样品在试验前均去除可见的筋膜和脂肪,并切割为均值块状。

化学试剂与标准品:腺嘌呤、鸟嘌呤、黄嘌呤、次黄嘌呤标准品(纯度>98%),均购自北京索莱宝科技有限公司。样品分析用甲醇(色谱级),磷酸二氢钾、氢氧化钠、盐酸、磷酸、甲酸和三氟乙酸,均为分析纯。

1.2 试验装置

本文定制的NBs协同曝气处理系统,由NBs发生器和处理水槽2个部分构成。

NBs发生器:加压溶气释放式NBs发生器(型号:LF-02PT,上海行恒科技有限公司)。其工作原理为:通过增压泵将水体加压至预设值,空气被自吸进入溶气罐,在压力作用下溶解于水中形成过饱和溶液,随后在压力的瞬时骤降和剧烈水力剪切共同作用下,形成大量弥散的NBs。

处理水槽:特制的处理水槽[尺寸:33 cm(长)×20.5 cm(宽)×12 cm(高)],底部设有曝气分散板、多孔承托板。曝气用于与NBs发生器协同工作,曝气功率为120 W,通过脉冲宽度调制(PWM)技术实现气体流量的精确控制,曝气强度通过占空比调控实现。

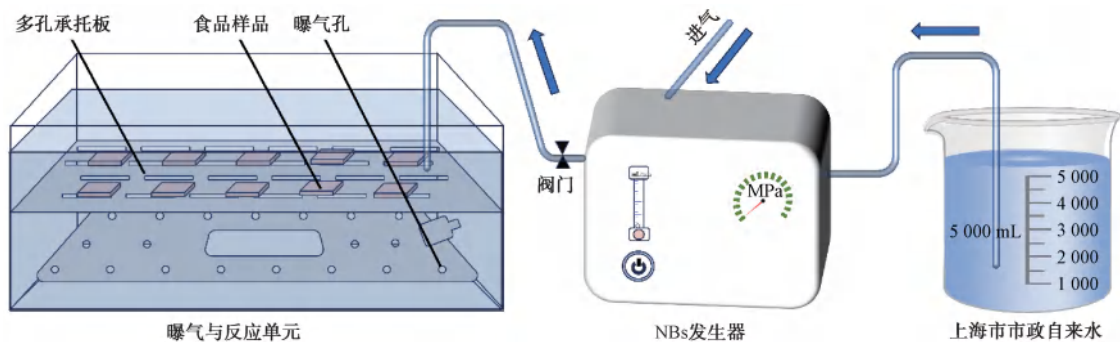


图1 试验装置

Fig. 1 Experiment Set-Up

1.3 试验方法

1.3.1 浸泡清洗去除嘌呤试验

将承托板等分为10个格子,精确称取10块(10.0±0.2)g鸡肉样品均匀放置于承托板中的10个格子内。启动NBs发生器,将释放压力调整到1 kg/cm²、气量为20 mL/min,待其稳定工作后,将生成的NBs水注入水槽,同时开始计时,控制最终含有NBs的水的水量为4 L。NBs与曝气联合处理时,待NBs水达到4 L后启动曝气,调整曝气功率至28%。总浸泡清洗处理时间为12 min,结束后将载样承托板

整体取出室温静置10 min,待食材上的游离水自然脱离,用于后续检测分析所含嘌呤。根据原样品和清洗处理后样品中嘌呤含量计算嘌呤去除率。

1.3.2 清洗工艺参数优化的正交试验

为了进一步优化NBs协同曝气清洗去除嘌呤的工艺参数,设计L₁₆(4³)三因素四水平正交试验。考察因素分别为:释放压力(A)、浸泡清洗与曝气清洗时间比(B)及曝气强度(C)。以总嘌呤去除率为评价指标,正交试验方案如表1所示,NBs的释放压力控制在1~4 kg/cm²,浸泡清洗与曝气清洗时间比

控制为 3 min : 9 min ~ 12 min : 0 min, 曝气强度控制在 14% ~ 56%。针对正交表中出现的 12 min : 0 min(纯浸泡)工况, 此时设定的曝气强度仅为满足试验设计的系统性对照, 实际处理过程无曝气引入。

表 1 浸泡清洗的正交试验设计方案

Tab. 1 Orthogonal Test Design Scheme for Soaking and Washing

水平	A/(kg·cm ⁻²)	B	C
1	1	3 min : 9 min	14%
2	2	6 min : 6 min	28%
3	3	9 min : 3 min	42%
4	4	12 min : 0 min	56%

每次试验精确称取 10 块(10.0±0.2)g 的新鲜鸡肉样品, 均匀放置于反应水槽中。根据正交表设

表 2 各类食材及其对应的具体清洗处理流程

Tab. 2 All Kinds of Food Materials and Corresponding Specific Cleaning and Processing Procedures

食材分类 (处理时间)	食材种类	具体清洗过程
轻处理(8 min)	里脊丝、鳕鱼	第 1 次进水, 进水+浸泡 3 min, 开始曝气 3.5 min; 第 2 次进水, 曝气 30 s, 关闭排水关闭曝气
中处理(12 min)	牛肉、鸡肉、黄鱼、河鲜鱼	第 1 次进水, 进水+浸泡 3 min, 开始曝气 7.5 min; 第 2 次进水, 曝气 30 s, 关闭排水关闭曝气
强处理(15 min)	蛭子、带鱼	第 1 次进水, 进水+浸泡 3 min, 曝气 5 min 随后排水, 关闭排水关闭曝气; 第 2 次进水, 曝气 5 min 随后排水, 关闭排水关闭曝气; 第 3 次进水, 曝气 30 s, 关闭排水关闭曝气

根据我国《成人高尿酸血症与痛风食养指南(2024 年版)》及国际通用标准, 食物按嘌呤质量分数分为 3 类。

低嘌呤食物(<50 mg/100 g), 包括谷物、蛋类、奶制品及大部分果蔬等, 建议患者放心食用。本文未涉及此类别的肉类测试对象。

中嘌呤食物(50~150 mg/100 g), 包括鸡肉、猪肉、牛肉及部分鱼类等, 建议患者限量食用。本文中大多数测试食材均属于此列, 测得其初始总嘌呤质量分数分别为: 鸡胸肉(136.60 mg/100 g)、猪里脊(129.30 mg/100 g)、黄鱼(121.37 mg/100 g)、牛肉(107.28 mg/100 g)、蛭子(94.65 mg/100 g)、鳕鱼(82.36 mg/100 g)及鲈鱼(56.48 mg/100 g)。

高嘌呤食物(>150 mg/100 g), 包括动物内脏(肝、肾)、贝类、沙丁鱼及浓肉汤等, 建议患者应避免食用^[14-15]。本文中的带鱼属于此类, 其测得初始总嘌呤质量分数高达 311.47 mg/100 g。

1.3.4 次黄嘌呤溶解试验

为剖析浸泡清洗去除嘌呤的机理, 设计嘌呤的溶解试验。定量评估不同曝气方式对嘌呤溶解过程的影响, 以本次试验大多数食材中高含量的次黄嘌呤

定的参数组合进行处理, 最终水量控制为 4 L, 总清洗时间为 12 min, 结束后将载样承托板整体取出静置 10 min。

1.3.3 清洗最优工况的普适性探究试验

基于正交试验确定的最优工艺参数, 系统评估其在 4 类典型食材上的普适性与基质依赖性: (1) 无骨肉类(猪里脊、牛肉、鸡胸肉); (2) 无骨无壳鱼类(鳕鱼); (3) 带鳞鱼类(河鲜鱼、黄鱼、带鱼); (4) 带壳贝类(蛭子)。根据食材的物理特性(如质地软硬、泥沙含量、有无物理屏障等), 实施分类清洗策略并相应调整了处理流程和时间, 如表 2 所示。每次试验精确称取 30 份食材样品[每份质量为(10.0±0.2)g], 最终控制水量为 4 L。

嘌呤为目标物, 在 50 mL 离心管中精密称取 1.0 mg 次黄嘌呤固体, 分别进行 3 种方式的处理: 对照组加入 10 mL 纯水静置; NBs 处理组加入 10 mL、2 kg/cm² 压力下制备的 NBs 水; 协同组在加入 NBs 水后启动曝气。

处理开始后于 3、6、9、12、24、36 min 时间点于距离水面 1 cm 处取样, 立即经 0.45 μm 滤膜过滤, 采用高效液相色谱(HPLC)测定次黄嘌呤质量浓度。次黄嘌呤的溶解效率按照式(1)计算, 绘制溶解效率曲线。

$$E = \frac{C_t}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

其中: E ——溶解效率;

C_t —— t 时刻次黄嘌呤质量浓度, mg/L;

C_0 ——次黄嘌呤完全溶解的平衡质量浓度, mg/L。

1.4 样品分析与表征方法

1.4.1 嘌呤提取与检测

本文采用改良的甲酸-三氟乙酸水解法提取嘌呤, 该方法在保证细胞核彻底破碎的同时, 能有效防

止高温下嘌呤碱基的氧化分解^[16]。

(1) 样品均质: 将控水后肉样置于搅拌机粉碎, 称取(1.0±0.15)g 并记录实际重量;

(2) 酸化水解: 样品移入 50 mL 离心管, 加入 10 mL 甲酸-三氟乙酸-纯水混合液(体积分数分别为 45%、45%、10%), 涡旋混匀后置于 90 °C 密闭水浴水解 30 min;

(3) 定容过滤: 待样品冷却至室温后, 转移至 50 mL 容量瓶并使用纯水定容, 使用 0.45 μm 聚醚砜滤膜过滤;

(4) 浓缩复溶: 移取 2 mL 滤液于旋转蒸发器, 在 90 °C、-0.1 MPa 下旋蒸至完全干燥, 残渣加 2 mL 的 0.02 mol/L 磷酸二氢钾(pH 值为 4.0) 作为复溶剂, 振荡使其充分溶解;

(5) 色谱前处理: 复溶液经 0.45 μm 聚醚砜滤膜过滤后, 转移至棕色色谱瓶, 4 °C 避光保存待测;

(6) HPLC 分析: 采用 C18 反相色谱柱(250 mm×4.6 mm, 5 μm); 流动相是浓度为 0.02 mol/L 的磷酸二氢钾缓冲液(pH 值为 4.0); 流速为 1.0 mL/min; 柱温为 25 °C; 检测波长为 254 nm; 进样量为 10 μL。通过建立标准品标准曲线定量分析样品。

1.4.2 微观结构表征

为直观揭示处理前后食品基质物理结构的改变, 采用扫描电子显微镜(SEM) 对处理前后的鸡肉样品进行微观形貌观察。将未经处理、自来水浸泡、NBs 水浸泡以及 NBs 协同曝气处理后的鸡肉样品进行冻干处理, 随后进行喷金处理, 在 SEM 下观察其表面纤维的排列、剖面 and 孔隙结构的变化情况。

1.4.3 NBs 表征

利用纳米颗粒追踪分析仪(NTA, ZetaView, Particle Metrix GmbH) 对以下 3 组关键工况下的 NBs 粒径以及浓度进行表征。(1) 最优协同参数: 释放压力为 2 kg/cm²、曝气强度为 42%、浸泡与曝气时间比为 3 min : 9 min; (2) 纯 NBs 水: 2 kg/cm² 压力生成 NBs, 无曝气干扰; (3) 自来水曝气: 自来水曝气强度为 42%、浸泡与曝气时间比为 3 min : 9 min。

2 结果与讨论

2.1 NBs 协同曝气的嘌呤清洗效果分析

NBs 协同曝气的嘌呤清洗效果分析首先对比自来水浸泡、NBs 水浸泡及 NBs 协同曝气 3 种处理方式对鸡肉嘌呤的去除效果。处理时间为 12 min。结

果如图 2 所示, 3 种处理方式表现出十分显著的嘌呤去除率差异。以总嘌呤去除率为清洗指标, 自来水浸泡的效果最差去除率仅有 2.57%; 利用 NBs 浸泡处理后, 总嘌呤去除效果得到明显提升, 达到 7.60%, 是自来水浸泡的 2.96 倍; 而当 NBs 与曝气联合处理后, 总嘌呤去除率提升至 15.27%, 其处理效果是单独 NBs 水浸泡处理的 2.01 倍, 是自来水浸泡的 5.94 倍, 展示了 NBs 水与曝气的协同增效作用。这种协同优势在各嘌呤组分的去除上得到普遍印证, 尤其对于含量最高的次黄嘌呤。如图 2(b) 所示, 联合处理对次黄嘌呤的去除率达到了 18.76%, 高于 NBs 水浸泡的 8.58%, 远高于自来水浸泡的 3.04%。这些数据证明了 NBs 与曝气的联合处理能够提升传统水力清洗对于鸡肉中嘌呤的去除, 其显著的协同效应为后续通过工艺优化进一步强化去除效果提供了方向。

进一步分析图 2 中不同嘌呤组分的差异, 可以发现去除量呈现出“次黄嘌呤>腺嘌呤>鸟嘌呤≈黄嘌呤”的趋势。这一现象可以从嘌呤分子的物理化学性质差异得到解释:

水溶性差异: 次黄嘌呤在 25 °C 水中的质量浓度相对较高(约为 0.4 g/L), 而鸟嘌呤和黄嘌呤几乎不溶于中性水(质量浓度<0.011 g/L)^[17]。本技术通过曝气强化了液相传质, 使得质量浓度最高的次黄嘌呤能够最快地从肉质内部扩散至水相中, 因此其去除率最高。

2.2 NBs 浸泡与曝气联合去除嘌呤优化

基于上述试验得到的协同效应, 本文采用 L₁₆(4³) 正交试验对 NBs 协同曝气工艺的关键参数进行了系统优化。如表 3 所示, 其中极差分析量化了各因素的主次顺序为: 因素 B(R=0.13)>因素 A(R=0.0975)>因素 C(R=0.025)。进一步对各因素在不同水平下的总和 K 值及均值 k 值进行分析, 可以更清晰地看到其影响规律。结合图 3 的主效应图分析可知, 对于最关键的因素 B, 采用 3 min : 9 min 的时间比(B₁) 时效果最佳(k₁=0.1625), 而完全采用浸泡(B₄, 12 min : 0 min) 时效果最差(k₄=0.0325), 这凸显了 2 种作用模式合理搭配的重要性。对于释放压力(因素 A), 在 2 kg/cm²(A₂) 时达到峰值(k₂=0.1625), 过高或过低的压力均导致效果下降。综合分析确定最优工艺组合为 A₂B₁C₃, 最

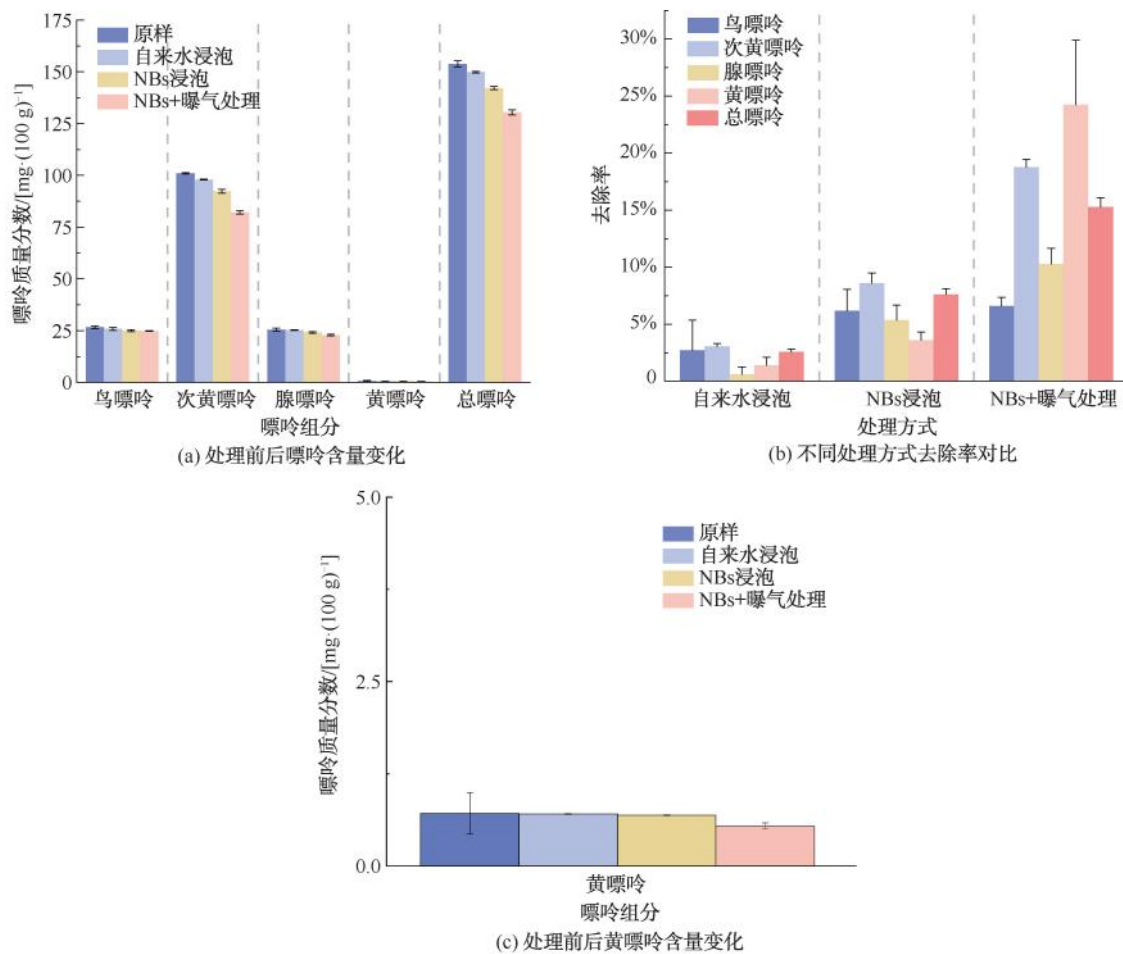


图 2 鸡肉中嘌呤处理前后含量变化与去除效率对比

Fig. 2 Comparison of the Content Changes and Removal Efficiency of Purines in Chicken before and after Treatment

终确定的最优工艺组合为: A 为 2 kg/cm^2 、B 为 $3 \text{ min} : 9 \text{ min}$ 、曝气量为 42% 。

2.3 最优工况对于不同食材中嘌呤去除效果

将 NBs 协同曝气优化工艺应用于多种食材的清洗处理,如图 4 所示。图 4 显示了良好的普适性与一定的基质依赖性。猪里脊作为高效脱除代表,总嘌呤质量分数从 $129.30 \text{ mg}/100 \text{ g}$ 降低至 $83.09 \text{ mg}/100 \text{ g}$,去除率为 35.74% ;次黄嘌呤质量分数从 $96.09 \text{ mg}/100 \text{ g}$ 降低至 $51.18 \text{ mg}/100 \text{ g}$,去除率为 46.74% ,其松散肌纤维结构有效促进嘌呤溶出。中效去除组中,牛肉总嘌呤从 $107.28 \text{ mg}/100 \text{ g}$ 降低至 $75.28 \text{ mg}/100 \text{ g}$,去除率为 29.83% ;鸡肉总嘌呤自 $136.60 \text{ mg}/100 \text{ g}$ 降低至 $94.24 \text{ mg}/100 \text{ g}$,去除率为 31.01% ;黄鱼总嘌呤由 $121.37 \text{ mg}/100 \text{ g}$ 降低至 $81.86 \text{ mg}/100 \text{ g}$,去除率为 32.55% 。低效组由多种因素引起,鳕鱼和鲈鱼因其初始嘌呤含量过低,总嘌呤分别自 $82.36 \text{ mg}/100 \text{ g}$ 降低至 $62.56 \text{ mg}/100 \text{ g}$,

去除率为 24.04% 和 $88.18 \text{ mg}/100 \text{ g}$ 降低至 $74.07 \text{ mg}/100 \text{ g}$,去除率为 16.00% ;蛭子因甲壳素屏障,总嘌呤质量分数从 $94.65 \text{ mg}/100 \text{ g}$ 降低至 $83.07 \text{ mg}/100 \text{ g}$,去除率为 12.24% ;次黄嘌呤仅从 $94.65 \text{ mg}/100 \text{ g}$ 降低至 $83.07 \text{ mg}/100 \text{ g}$,去除率为 11.73% ,证实物理屏障的核心限制作用。带鱼的原样总嘌呤高达 $311.47 \text{ mg}/100 \text{ g}$,经处理降至 $220.20 \text{ mg}/100 \text{ g}$,去除率为 29.30% ,但剩余嘌呤含量仍远高于其他食材,表明高嘌呤含量食材仍需针对性优化工艺。

初始嘌呤含量对去除效果表现出了一定的影响规律。根据菲克扩散定律,传质速率与浓度梯度成正比。在猪里脊和带鱼等初始嘌呤质量分数较高 ($>120 \text{ mg}/100 \text{ g}$) 的基质中,内外浓度差大,驱动力强,因此绝对去除量和去除率均较高。相反,对于鳕鱼(初始质量分数为 $82.36 \text{ mg}/100 \text{ g}$) 等低嘌呤食材,浓度梯度较小,限制了扩散速率,导致去除率相对较低(24.04%)。

表 3 嘌呤去除结果极差分析
Tab. 3 Range Analysis of Purine Removal Results

试验编号/ 统计项	A/ ($\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$)	B	C	总嘌呤 去除率
A ₁ B ₁ C ₁	1	3 min : 9 min	14%	14%
A ₁ B ₂ C ₂	1	6 min : 6 min	28%	8%
A ₁ B ₃ C ₃	1	9 min : 3 min	42%	10%
A ₁ B ₄ C ₄	1	12 min : 0 min	56%	5%
A ₂ B ₁ C ₂	2	3 min : 9 min	28%	26%
A ₂ B ₂ C ₁	2	6 min : 6 min	14%	16%
A ₂ B ₃ C ₄	2	9 min : 3 min	56%	15%
A ₂ B ₄ C ₃	2	12 min : 0 min	42%	8%
A ₃ B ₁ C ₃	3	3 min : 9 min	42%	16%
A ₃ B ₂ C ₄	3	6 min : 6 min	56%	11%
A ₃ B ₃ C ₁	3	9 min : 3 min	14%	4%
A ₃ B ₄ C ₂	3	12 min : 0 min	28%	0%
A ₄ B ₁ C ₄	4	3 min : 9 min	56%	9%
A ₄ B ₂ C ₃	4	6 min : 6 min	42%	10%
A ₄ B ₃ C ₂	4	9 min : 3 min	28%	7%
A ₄ B ₄ C ₁	4	12 min : 0 min	14%	0
K ₁	0.37	0.65	0.34	
K ₂	0.65	0.45	0.41	
K ₃	0.31	0.36	0.44	
K ₄	0.26	0.13	0.4	
k ₁	0.092 5	0.162 5	0.085	
k ₂	0.162 5	0.112 5	0.102 5	
k ₃	0.077 5	0.09	0.11	
k ₄	0.065	0.032 5	0.1	
R	0.097 5	0.13	0.025	

注:K₁、K₂、K₃、K₄ 分别表示这 3 个因素在 4 种水平下总嘌呤去除率的和;k₁、k₂、k₃、k₄ 分别表示这 3 个因素在 4 种水平下总嘌呤去除率的均值;R 为极差,R 值越大表明该因素对试验结果的影响越显著。

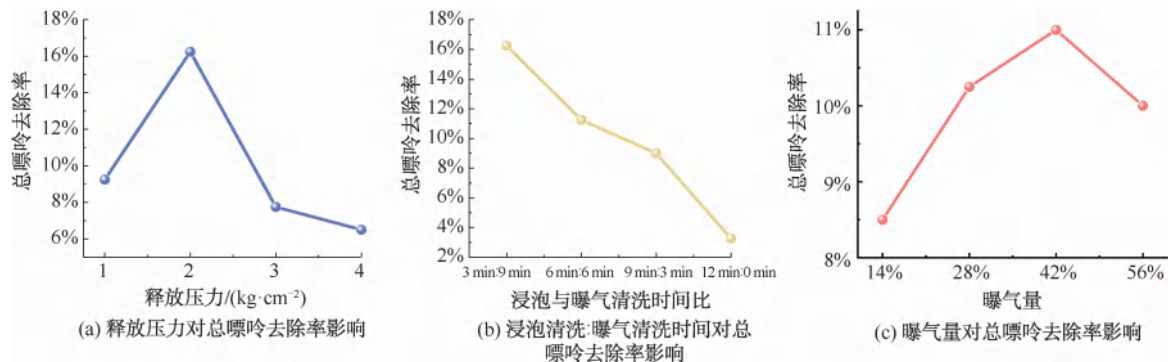


图 3 嘌呤去除率均值主效应图

Fig. 3 Main Effect Plot of the Mean Rates of Purine Removal

2.4 NBs 去除嘌呤的机理探讨

2.4.1 NBs 表征

图 5(a) 和图 5(b) 为在不同处理条件下,水中 NBs 浓度与平均粒径随时间的动态变化过程。在纳米气泡的数量浓度方面,NBs 与曝气联合处理产生的气泡数量显著高于单独纳米气泡处理以及单独曝气处理,并在 12 min 时达到 7.9×10^7 个/mL 的峰值,证实了曝气的引入能有效促进 NBs 的生成与稳定。而在 NBs 的平均粒径变化方面,联合处理的平均直径呈现波动的复杂趋势,在 3 min 达到 122.6 nm 的峰值后,在 9 min 最小约 112.9 nm 的谷值。可能是因为初期产生的大规模气泡发生系统部分聚并,随后大气泡重新破碎成更小的气泡,处理 12 min 后不同工况下 NBs 粒径分布如图 6 所示。

2.4.2 SEM 分析

由图 7 可知,未处理的鸡肉表面纤维排布紧密、光滑,清水浸泡后的鸡肉纤维出现轻微的松散和分离,NBs 浸泡及 NBs+曝气浸泡处理后,鸡肉纤维断裂程度越发明显,表面逐渐形成多层级丝网状结构。NBs 水浸泡后的纤维分散程度明显加剧,NBs 叠加曝气处理后,流体剪切力与气泡溃灭产生协同作用,最终形成孔隙丰富且高度贯通的网状结构。

2.4.3 基于传质理论分析

为深入探究 NBs 协同曝气浸泡去除鸡肉中嘌呤的机理,分析次黄嘌呤在不同处理条件下的溶解动力学过程。如图 8 所示,3 种处理方法的嘌呤溶解动力学曲线呈现出截然不同的特征,清晰地揭示了协同作用对传质速率的巨大影响。

自来水浸泡组的溶解过程表现为典型的扩散限制特征。在 3 min 时,溶解率仅为 51.50%,随后增

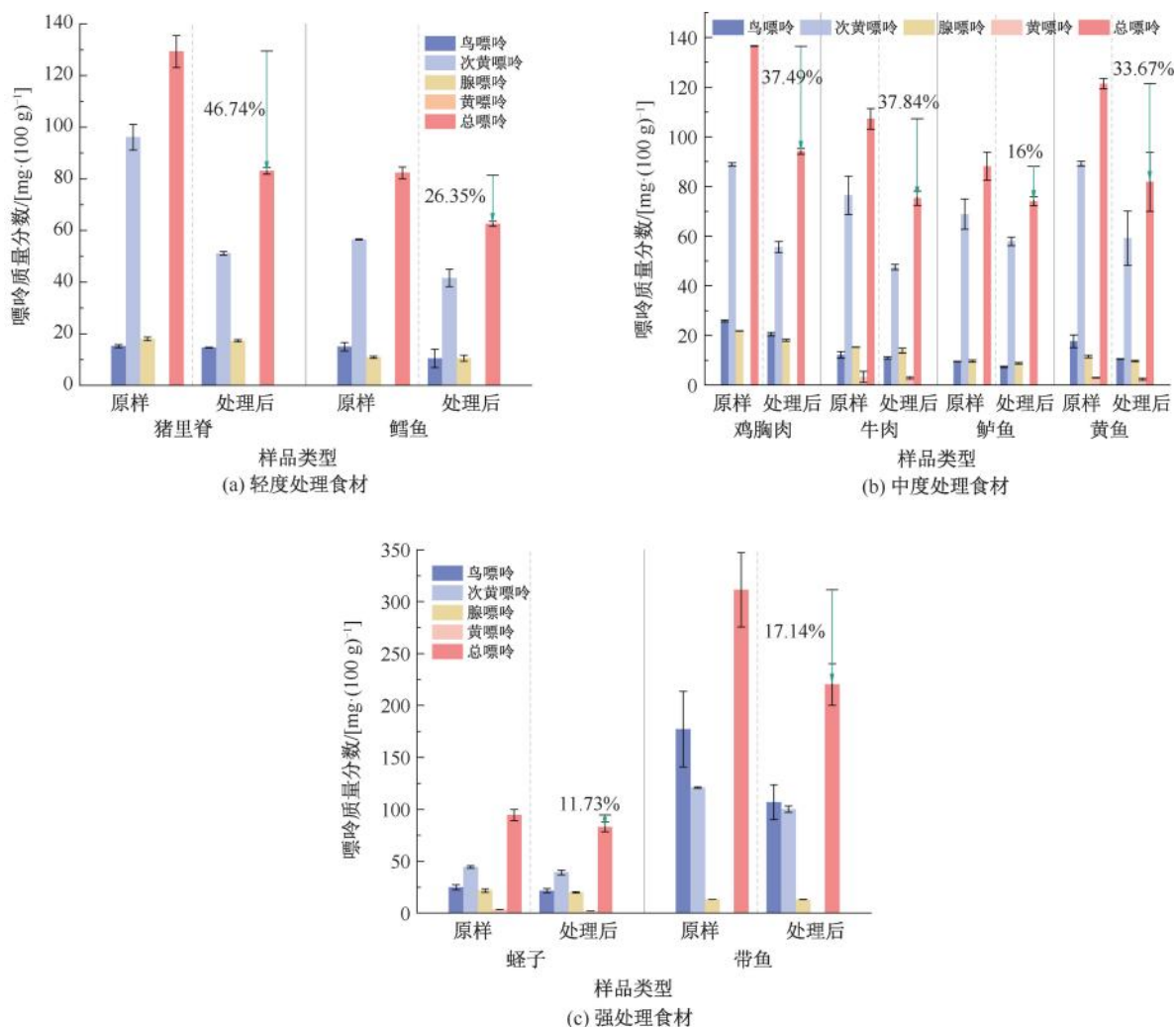


图 4 NBs 与曝气联合浸泡处理对不同食材基质中嘌呤含量及去除效果比较

Fig. 4 Comparison of Purine Content and Removal Effect in Different Food Substrates by Combined Soaking Treatment with NBs and Aeration

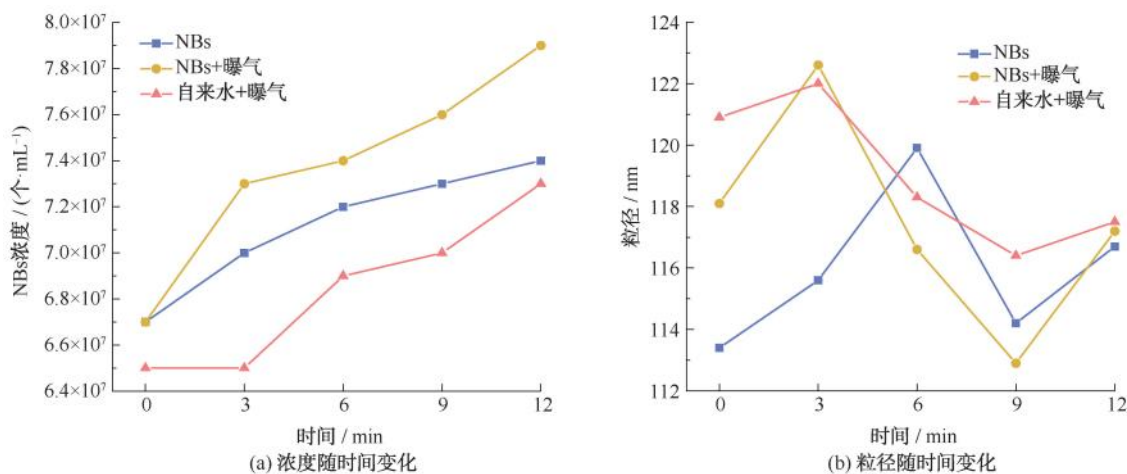
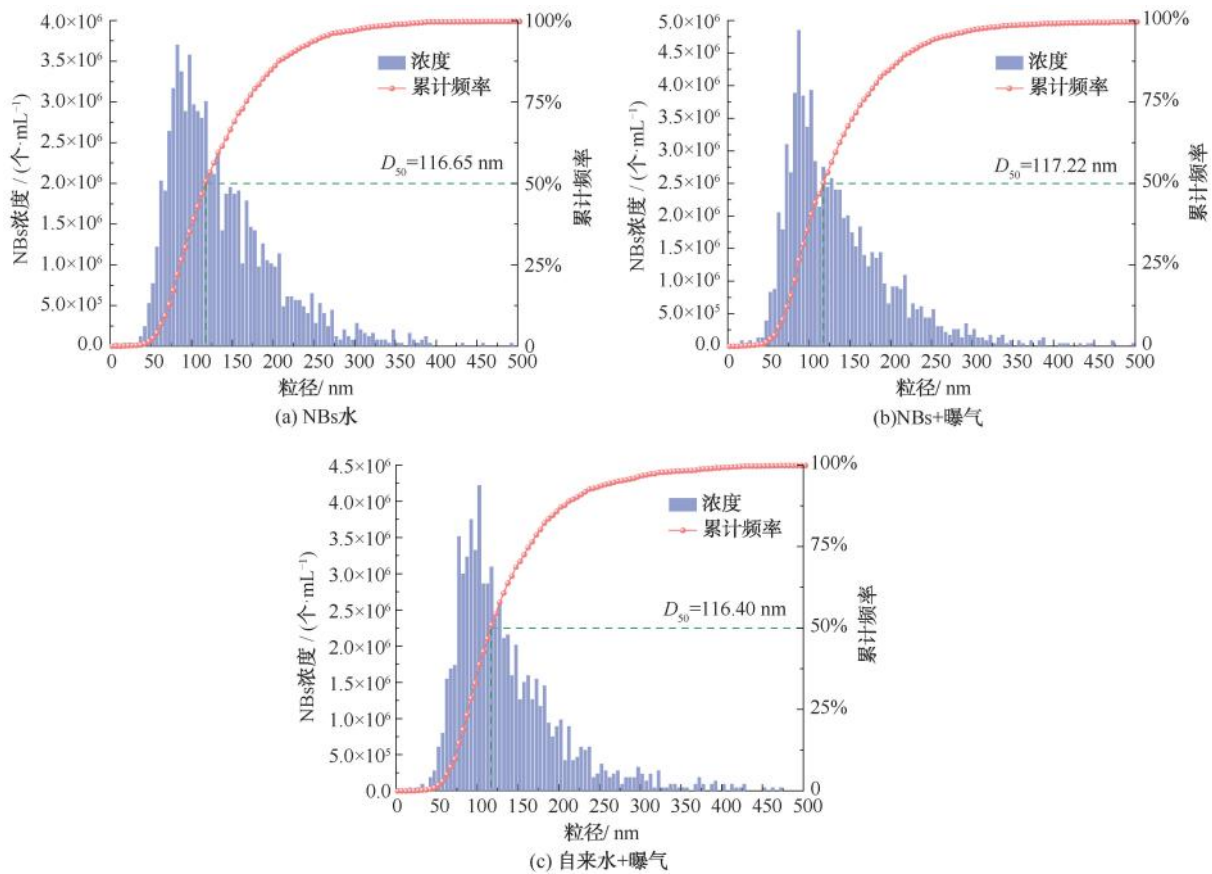


图 5 不同处理方式下 NBs 浓度与粒径的动态变化

Fig. 5 Dynamic Changes of NBs Concentration and Particle Size under Different Treatment Methods



注: D_{50} ——一个样品累计粒度分布百分数达到 50% 时所对应的粒径。

图 6 处理 12 min 后粒径及浓度分布

Fig. 6 Particle Size and Concentration Distribution after 12 Minutes of Treatment

长极为缓慢,在 36 min 的处理周期内,溶解率仅从 51.50% 升至 59.36%,总增幅不足 8%。这表明在无外力强化的条件下,仅依靠浓度梯度驱动的自然扩散,传质效率极低。

单独 NBs 水浸泡组的效果相较于对照组有一定提升。其初始溶解率与对照组相近,但在 12 分钟后开始表现出优势,溶解率达到 57.36%,高于对照组的 52.56%。最终在 36 min 时,溶解率达到 63.91%,比对照组增加了 11.35 百分点。这说明 NBs 的微观作用确实能够提升溶解效率,但其效果的提升是循序渐进的。

NBs 协同曝气组的溶解速率最高。该组在处理开始的瞬间便表现出极高的传质速率,仅用 3 min,溶解率便迅速上升至 72.40%,随后的溶解过程持续高效进行,6 min 时达到 75.96%,最终在 36 min 稳定在 84.88%。与自来水组和单独 NBs 组的最终结果相比,其溶解率的绝对提升值分别高达 25.52% 和 20.97%。

溶解效率的试验数据完美地印证了 SEM 的观察结果和多尺度协同机理。协同处理组极高的初始速率排除了简单物理吸附的主导作用,有力地证实了 NBs 和曝气形成了高效协同:NBs 的表面疏水和荷电特性,使其容易吸附并富集嘌呤;曝气不但促进了更多 NBs 的生成,更主要的是产生的强制对流极大地减小了液相传质边界层的厚度,将富集嘌呤的 NBs 迅速带离界面,始终维持了高浓度梯度这一核心传质驱动力,从而实现了传质过程的持续高效。

3 结论

本文系统地探索了 NBs 技术在强化自来水在清洗功能属性方面的潜力,并初步揭示了其内在的物理作用机理。主要结论如下。

(1) 协同效应显著:NBs 与曝气联合处理对鸡肉中嘌呤(尤其是次黄嘌呤)的去除效果显著优于 NBs 浸泡及自来水浸泡,展现出显著的协同增效作用。

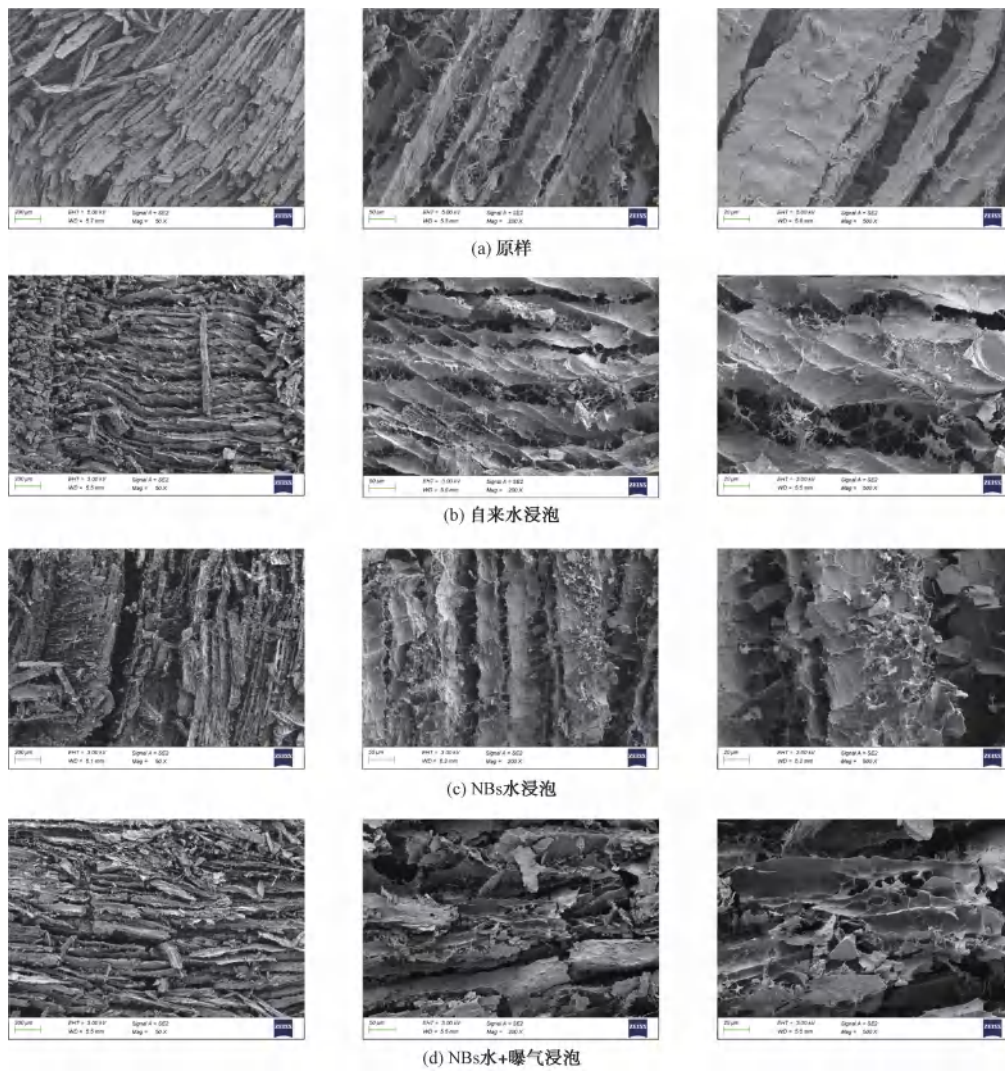


图 7 处理前后鸡肉 SEM 变化

Fig. 7 SEM Changes of Chicken before and after Treatment

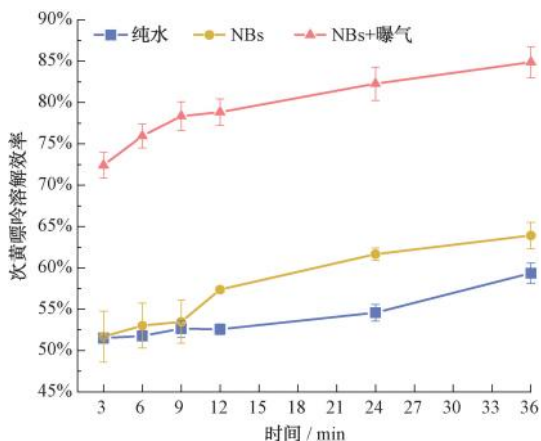


图 8 纯水、NBs 以及 NBs 水+曝气情况下溶解效率随时间的变化

Fig. 8 Variation of Dissolution Efficiency with Time in Pure Water, NBs Water and NBs Water + Aeration Conditions

(2) 传质机理明确: 该技术的强化传质核心机理在于协同物理作用, 即 NBs 吸附富集嘌呤分子, 同时曝气产生的剪切力松散基质并加速溶出物扩散, 共同维持高传质驱动力。

(3) 原理普适性强: 该基于协同物理作用的界面传质强化原理具有高度普适性, 针对不同基质的食材均表现出促进嘌呤溶出的规律, 同时为固-液界面传质瓶颈问题提供了有效途径。

(4) 本技术在家庭化应用中具有较好的经济可行性。系统能耗极低 (处理一次耗电约为 $0.0228 \text{ kW}\cdot\text{h}$), 且无需添加任何化学药剂。然而, 实际应用受自来水水质影响: 高硬度水可能导致气泡界面析出钙盐从而降低效率, 而弱碱性环则有助于维持气泡的电学稳定性。

参考文献

- [1] Cupic V, Bartula M, Ivanovic S, et al. Household chemicals as possible causes of poisoning and environmental pollution [J]. Matica Srpska Journal for Natural Sciences, 2023, 145: 97–121. DOI: 10.2298/ZMSPN2345097C.
- [2] Lin K H, Tsai J H, Cheng C C, et al. Emission of volatile organic compounds from consumer products [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2022, 22(9): 220250. DOI: 10.4209/aaqr.220250.
- [3] Gang J. Environmental friendly sanitation to improve quality and microbial safety of fresh-cut vegetables [M]//Biotechnology: molecular studies and novel applications for improved quality of human life. Manila: InTech, 2012.
- [4] Wang X L, Li P, Ning R S, et al. Mechanisms on stability of bulk nanobubble and relevant applications: A review [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 426: 139153. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.139153.
- [5] Ghoohestani M, Rezaee S, Kadivar E, et al. Reactive-dynamic characteristics of a nanobubble collapse near a solid boundary using molecular dynamic simulation [J]. Physics of Fluids, 2023, 35(2): 022003. DOI: 10.1063/5.0139169.
- [6] Kaushik G, Satya S, Naik S N. Food processing a tool to pesticide residue dissipation – A review [J]. Food Research International, 2009, 42(1): 26–40.
- [7] Li C J, Xie Y F, Guo Y H, et al. Effects of ozone-microbubble treatment on the removal of residual pesticides and the adsorption mechanism of pesticides onto the apple matrix [J]. Food Control, 2021, 120: 107548. DOI: 10.1016/j.foodcont.2020.107548.
- [8] 历翔宇, 肖更生, 吴继军, 等. 新型绿色农产品清洗减菌技术研究进展 [J]. 食品研究与开发, 2022, 43(21): 208–217.
Li X Y, Xiao G S, Wu J J, et al. Novel green cleaning and bacteria reduction technologies for agricultural products [J]. Food Research and Development, 2022, 43(21): 208–217.
- [9] 张思琦, 刘颖, 林秋霞, 等. 微酸性次氯酸微纳米气泡净化机对食品和物品的消毒效果研究 [J]. 中国消毒学杂志, 2020, 37(10): 741–743, 747.
Zhang S Q, Liu Y, Lin Q X, et al. Research on the disinfection effect of slightly acidic hypochlorous acid micro-nano bubble purifier on food and related items [J]. Chinese Journal of Disinfection, 2020, 37(10): 741–743, 747.
- [10] Shmerling R H. Management of gout: A 57-year-old man with a history of podagra, hyperuricemia, and mild renal insufficiency [J]. Jama, 2012, 308(20): 2133. DOI: 10.1001/jama.2012.65028.
- [11] 周智雯. 不同烹饪方式对羊肉品质及嘌呤含量的影响 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
Zhou Z W. Effect of different cooking methods on quality and purine content of lamb [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.
- [12] Wang Y, Li A M, Chen D P. Status and prospects of nutritional cooking [J]. Food Quality and Safety, 2019, 3(3): 137–143.
- [13] Gómez I, Janardhanan R, Ibañez F C, et al. The effects of processing and preservation technologies on meat quality: Sensory and nutritional aspects [J]. Foods, 2020, 9(10): 1416. DOI: 10.3390/foods9101416.
- [14] 谷传玲. 痛风病人的饮食清单 [J]. 安全与健康, 2018(1): 54.
Gu C L. Diet list of gout patients [J]. Safety & Health, 2018(1): 54.
- [15] 陕弋华. 超重或肥胖高尿酸血症病人食疗护理方案的构建与应用 [D]. 太原: 山西医科大学, 2023.
Shan Y H. Construction and application of dietary therapy nursing program for overweight or obese hyperuricemia patients [D]. Taiyuan: Shanxi Medical University, 2023.
- [16] Wu M L, Zhang W G, Shen X X, et al. Simultaneous determination of purines and uric acid in Chinese chicken broth using TFA/FA hydrolysis coupled with HPLC-VWD [J]. Foods, 2021, 10(11): 2814. DOI: 10.3390/foods10112814.
- [17] 程莉, 张加玲. 尿酸和嘌呤在水和磷酸盐缓冲介质中溶解度的测定 [J]. 中国食物与营养, 2014, 20(11): 67–69.
Cheng L, Zhang J L. Determination of solubility of uric acid and purine in water and phosphate buffer [J]. Food and Nutrition in China, 2014, 20(11): 67–69.